



**ESTENSIONE DEI GHIACCIAI TARENTINI
DALLA FINE DELLA
PICCOLA ETÀ GLACIALE A OGGI.
—
RILEVAMENTO SUL TERRENO,
DIGITALIZZAZIONE GIS
E ANALISI**

Agosto 2015

Dott.ssa Elena Bertoni
collaboratrice Sezione di Geologia e Paleontologia del Muse
elena.bertoni@muse.it

Coordinamento scientifico:
Dott. Christian Casarotto
glaciologo e mediatore culturale del Muse
christian.casarotto@muse.it

Un progetto finanziato dal Servizio
sviluppo sostenibile e aree protette
rif. prot. n. P001/0640691/29-2014-16
di data 2 dicembre 2014

INDICE

1.	Oggetto ed attività del progetto	pag. 1
2.	La Piccola Età Glaciale	3
2.1	Introduzione	3
2.2	La Piccola Età Glaciale o Piccola Glaciazione	4
2.3	Sincronia di eventi	6
2.4	La Piccola Età Glaciale e la storia umana nelle Alpi centro-orientali	9
3.	Metodi	11
3.1	Ricostruzione della massima estensione dei ghiacciai del Trentino nella Piccola Età Glaciale	11
3.2	Evoluzione dei ghiacciai del Trentino dalla Piccola Età Glaciale ad oggi. Documenti utilizzati	12
3.3	Problematiche	14
3.4	Digitalizzazione in ambiente GIS. Struttura ed organizzazione del geodatabase	15
4.	Risultati. PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013	19
4.1	Areali	19
4.1.1	Inquadramento generale	19
4.1.2	Analisi statistica nei diversi gruppi montuosi del Trentino	22
	Cevedale	23
	Presanella	25
	Adamello	27
	Dolomiti di Brenta	29
	Marmolada	31
	Pale di San Martino	33
4.2	Quote dei fronti glaciali	35
4.2.1	Inquadramento generale	36
4.2.2	Analisi statistica nei diversi gruppi montuosi del Trentino	37
4.2.3	Variazioni frontali e clima	39
4.3	Diagramma ad albero	42
5.	Conclusioni	43
6.	Bibliografia di riferimento	46
7.	Allegati	48

1. OGGETTO ED ATTIVITÀ DEL PROGETTO

Con deliberazione della Giunta provinciale n. 1836 di data 5 agosto 2010 sono stati istituiti il Tavolo provinciale di coordinamento e di azione sui cambiamenti climatici, quale strumento di collaborazione tra le strutture provinciali, per l'individuazione delle strategie per fronteggiare gli impatti derivanti dai cambiamenti climatici e l'Osservatorio Trentino sul clima a cui è demandato il coordinamento tecnico-scientifico delle realtà impegnate a vario titolo sul territorio trentino in attività di ricerca e di monitoraggio delle variabili climatiche, nonché impegnate in attività di divulgazione scientifica, di campagne di informazione e di educazione ambientale. Le attività e gli aspetti organizzativi dell'Osservatorio Trentino sul clima sono definiti nell'accordo di programma sottoscritto in data 13/12/2010 dalle Parti che lo costituiscono, tra le quali anche il Muse - Museo delle Scienze, e che prevede le funzioni di coordinamento generale e di segreteria affidate al Dirigente Generale del Dipartimento Protezione Civile.

Nell'ambito delle attività promosse dall'Osservatorio Trentino sul Clima è stata individuata quale prioritaria la realizzazione di uno studio completo sul clima del Trentino finalizzato anche alla realizzazione di un Atlante Climatico. In tale contesto risulta di fondamentale importanza il completamento delle informazioni relative allo stato dei ghiacciai estendendo la base di dati nel passato per disporre di un quadro più esaustivo sull'evoluzione dei ghiacciai e sulla variazione dell'estensione superficiale alla luce dei cambiamenti climatici in atto. La Provincia autonoma di Trento (PAT) e il Muse hanno sottoscritto l'Accordo di Programma "stralcio" per l'anno 2014, approvato con deliberazione di Giunta provinciale n. 1358 del 4 agosto 2014. All'interno di questo, il Direttore Generale della PAT rilascia il proprio assenso per il finanziamento dell'attività che prevede la digitalizzazione dei ghiacciai dalla fine della Piccola Età Glaciale (PEG) ad oggi, con nota prot. n. P001/0640694/29-2014-16 di data 2 dicembre 2014, e il Servizio Sviluppo Sostenibile e Aree Protette provvede a incaricare il Muse con nota prot. S175/2015/22128/17.10.20152 del 16 gennaio 2015 alla quale si rimanda per il dettaglio delle attività, modalità e tempi di realizzazione, costi del progetto ed entità del finanziamento concesso, modalità di pagamento e rendicontazione, responsabilità, proprietà dei risultati e pubblicità, regime fiscale e referenti.

Nel corso del 2014-2015 il Muse e l'Ufficio Previsioni e Pianificazione - Servizio Prevenzione Rischi della PAT hanno portato a completamento la digitalizzazione di tutti i ghiacciai della provincia su base Lidar 2013 al fine di redigere un catasto aggiornato dei ghiacciai. Per meglio comprendere l'evoluzione della criosfera si vuole migliorare il contenuto del catasto e lo studio delle dinamiche glaciali indagando l'evoluzione dei ghiacciai trentini dalla fine della Piccola Età Glaciale (1850 circa) ad oggi, evoluzione che emerge dal contenuto del presente lavoro.

All'interno del progetto sono state svolte le seguenti attività:

- indagini geomorfologiche sul terreno per la cartografia di morene, depositi glaciali e rock glaciers attivi riferibili alla PEG;
- riconoscimento delle stesse morfologie attraverso telerilevamento (immagini ortofoto e Lidar);
- impostazione in ambiente GIS degli elementi geomorfologici relativi alla PEG utile a cartografare le morfologie e il perimetro dei ghiacciai e definire i loro attributi spaziali e geometrici (materiale nel DVD allegato);

- indagine dei catasti storici dei ghiacciai degli anni 1925 e 1958 redatti dal Comitato Glaciologico Italiano. Le cartografie del 1958 sono state georeferenziate e digitalizzate in modo da ricostruire, sempre in ambiente GIS, i limiti dei ghiacciai in questo periodo (materiale nel DVD allegato);
- impostazione in ambiente GIS di un geodatabase che raccoglie tutte le informazioni relative ai ghiacciai nei periodi PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013 (materiale nel DVD allegato);
- elaborazioni statistiche per meglio comprendere l'evoluzione della criosfera trentina dalla fine della PEG ad oggi, nei diversi intervalli temporali tra un catasto e l'altro, con un inquadramento generale e a livello di singolo gruppo montuoso;
- elaborazione in ambiente GIS per definire la quota minima dei ghiacciai nella PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013;
- realizzazione di un diagramma ad albero per rappresentare, in forma gerarchica, l'evoluzione in numero e nome dei ghiacciai trentini dalla PEG ad oggi (materiale allegato alla presente);
- realizzazione di prodotti cartografici per rappresentare graficamente i limiti dei ghiacciai nei seguenti periodi: PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013 (materiale allegato alla presente).

2. LA PICCOLA ETÀ GLACIALE

2.1. Introduzione

La fase attuale di accentuato ritiro dei ghiacciai si colloca in una più lunga storia di variazioni glaciali, documentate sia da misure e osservazioni dirette effettuate nell'ultimo secolo, sia da più antiche testimonianze storiche e soprattutto geomorfologiche. Da queste fonti di informazione sappiamo che nella seconda metà del 1800 si concluse una lunga fase di attività positiva dei ghiacciai, nota come "Piccola Età Glaciale" (abbreviata PEG). Da allora è in corso una fase di progressivo ritiro, interrotta da modeste e brevi fasi di riavanzata prodottesi intorno al 1890, 1920 e negli anni tra il 1970 e il 1985.

Sebbene non vi sia completo accordo sulla sua durata e rilevanza a carattere globale, la PEG nelle Alpi si ritiene sia cominciata all'inizio del secolo XIV, quando il maggiore dei ghiacciai alpini, il Ghiacciaio dell'Aletsch (Alpi Bernesi, Vallese CH), da posizioni simili a quelle attuali iniziò ad avanzare, raggiungendo intorno al 1370-1380 la sua massima estensione (Holzhauser et al., 2005). Anche gli studi storici sul clima in Europa pongono l'inizio della Piccola Età Glaciale all'inizio del secolo XIV (Le Roy Ladurie, 2004). Dopo la prima fase di avanzata nel secolo XIV, l'Aletsch e molti altri ghiacciai alpini hanno lasciato tracce di due importanti fasi di avanzata, nel secolo XVII e nel secolo XIX. Queste tre maggiori fasi di avanzata sono state intercalate da minori fasi di ritiro e da pulsazioni intermedie.

Nei ghiacciai italiani l'ultima fase di avanzata della PEG è stata in generale la più estesa, cancellando o nascondendo le tracce delle precedenti. Quasi tutti i ghiacciai italiani mostrano morene laterali e talora frontali ben sviluppate, edificate o comunque accresciute nella fase finale della PEG.

Con il 1860 ha inizio la fase attuale di ritiro e molti ghiacciai si ritiene siano ora più ridotti che all'inizio della PEG, mentre un buon numero di piccoli ghiacciai è interamente scomparso.

Gli studi sulle variazioni climatiche in epoca storica in Europa hanno da tempo messo in evidenza una fase calda antecedente la PEG, nota come Periodo Caldo Medievale (secoli IX–XIII). L'estensione dei ghiacciai alpini immediatamente prima della PEG è poco nota, come avviene in generale per tutte le fasi di contrazione, le cui tracce sono state cancellate dalle successive fasi di avanzata. Le variazioni glaciali dei millenni precedenti sono note unicamente da evidenze di tipo geologico, stratigrafico, morfologico e paleobiologico, la cui datazione è alquanto imprecisa, spesso con l'approssimazione di numerosi decenni se non addirittura di alcuni secoli (fig. 2.1). Si può quindi facilmente intendere come solamente le fasi glaciali più intense e di maggiore durata (plurisecolari) possano essere ragionevolmente ricostruite e, spesso, con limiti cronologici molto approssimati.

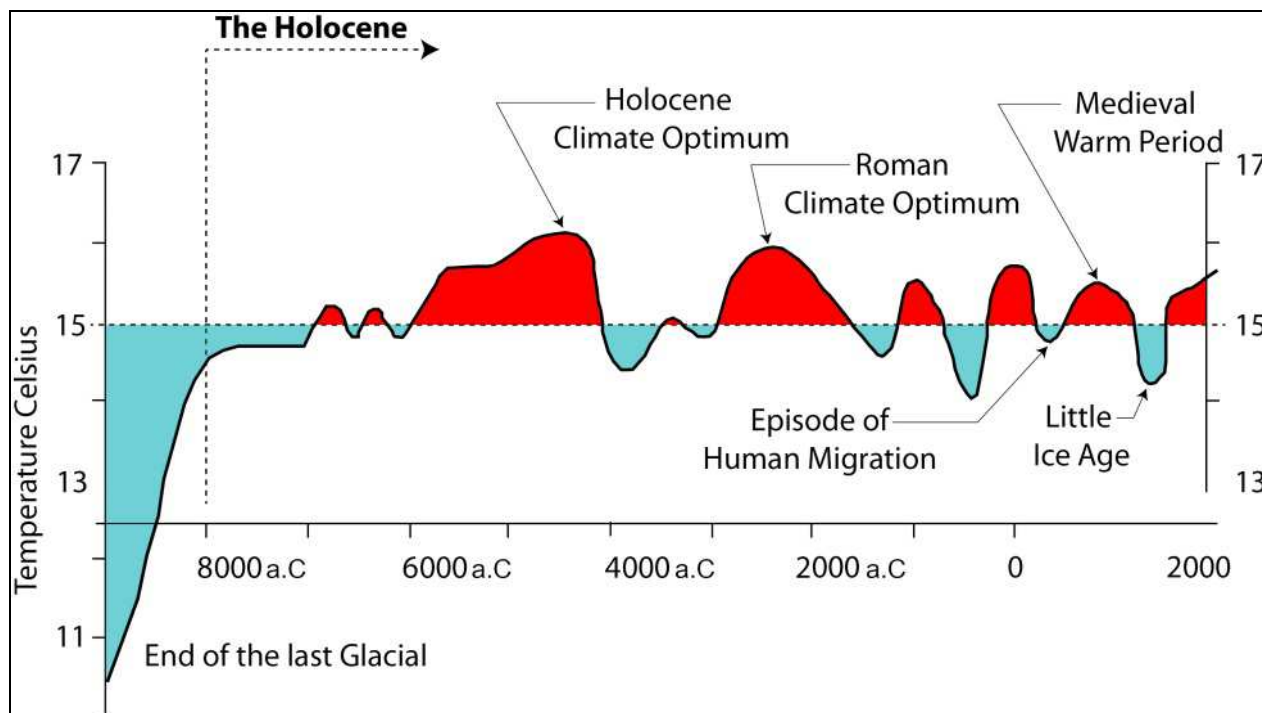


Fig. 2.1. La temperatura nell'Olocene (Dansgaard et al., 1969. Modificato).

2.2 La Piccola Età Glaciale o Piccola Glaciazione

Negli anni precedenti la Piccola Età Glaciale resta nella coscienza delle popolazioni alpine il ricordo vago e nebuloso di un'età felice, quando il clima era più mite, alberi e coltivi si spingevano a quote più elevate e i ghiacciai erano lontani. L'Europa dopo il 750 d.C. gode infatti di un clima mite per qualche secolo. La banchisa artica si ritira a nord e possono essere attuati viaggi tra la Penisola scandinava, Islanda e Groenlandia. Il grano cresce in Islanda e perfino in Groenlandia, mentre la pesca si sviluppa nei mari settentrionali e la vite viene coltivata oltre 500 km più a nord rispetto al limite attuale (localizzato tra i 47° e i 52° N).

Poi la situazione cambia sensibilmente. Dopo il 1200 le comunicazioni fra Norvegia, Islanda e Groenlandia sono rese difficili dal ghiaccio marino, il grano non cresce più in Islanda e alla fine del XV secolo gli abitanti della Groenlandia escono virtualmente dalla storia. A partire dalla seconda metà del XVI secolo i ghiacciai delle montagne europee si rigonfiano, le loro lingue in avanzata distruggono i pascoli più elevati e danneggiano i villaggi sottostanti, come raccontano anche le illustrazioni dell'epoca (fig. 2.2). Frequenti diventano le catastrofi provocate dai torrenti glaciali, dalle frane e dalle valanghe. Inizia la Piccola Età Glaciale. Matthes, che per primo utilizzò il termine "Little Ice Age", voleva indicare "un periodo di rinnovata ma modesta espansione glaciale seguita alla parte più calda dell'Olocene" (Matthes, 1939). Studiosi americani, come Porter e Denton (1967) proposero il termine Neoglaciation (Neoglaciazione) per definire la fase di nuovo sviluppo e di ripresa dei ghiacciai dopo il ritiro o la completa sparizione avvenuta durante il periodo caldo dell'Olocene.



*Fig. 2.2
Tra il XVI e il XIX secolo i
lungi periodi di gelo
portarono la città di Londra
a organizzare delle fiere del
ghiaccio lungo il fiume
Tamigi (Thames Frost Fair,
1683-84, Thomas Wyke).*

Attualmente il termine Little Ice Age è ampiamente utilizzato da geografi, geologi, glaciologi e climatologi anche in lingue diverse dall'inglese. Recentemente anche in lavori di lingua tedesca è stata usata la traduzione dall'inglese "Kleine Eiszeit".

Documentazioni storiche ed evidenze geomorfologiche permettono di ricostruire lo sviluppo della PEG. Anche attraverso queste indagini emerge che non si è verificato un unico episodio di avanzata glaciale, ma si è trattato di una serie di oscillazioni che ha portato le fronti dei ghiacciai in più riprese ad occupare una delle posizioni più avanzate (oppure la posizione più avanzata) dell'intero Olocene. I documenti scritti, i disegni e gli schizzi cartografici, ci presentano con vivacità le reazioni che questi eventi hanno suscitato nei contemporanei. Inoltre, le tracce lasciate dai ghiacciai sul terreno, specialmente le morene, offrono agli studiosi che le sanno interpretare un quadro altrettanto vivo e realistico delle avanzate e dei ritiri che hanno caratterizzato la PEG.

La documentazione storica è chiaramente più ricca per l'Europa che non per gli altri continenti; decenni di ricerche sul campo hanno comunque consentito di raccogliere evidenze geomorfologiche in tutte le regioni della Terra e permettono quindi un'analisi pressoché completa dei fatti e della loro distribuzione nel tempo e nello spazio.

2.3 Sincronia di eventi

A grandi linee, l'inizio della PEG e le sue principali fasi di espansione sulle Alpi si presentano sincroni anche al di fuori d'Europa. Le datazioni delle morene deposte, diverse come numero e dimensioni in relazione alla situazione topografica e all'alimentazione detritica di ogni singolo ghiacciaio, mostrano un accordo sorprendente. Ciò vale per il Monte Rainier negli Stati Uniti, per le montagne del Canada, dell'Alaska, della Nuova Zelanda, del Sud America (per quest'ultima regione si hanno conferme anche dall'analisi di carote di ghiaccio delle Ande Peruviane) per quanto riguarda gli ultimi quattro secoli; per altre regioni come il Caucaso, l'Himalaya e la Cina vi sono evidenze certe di questa corrispondenza solo per la metà del XIX secolo.

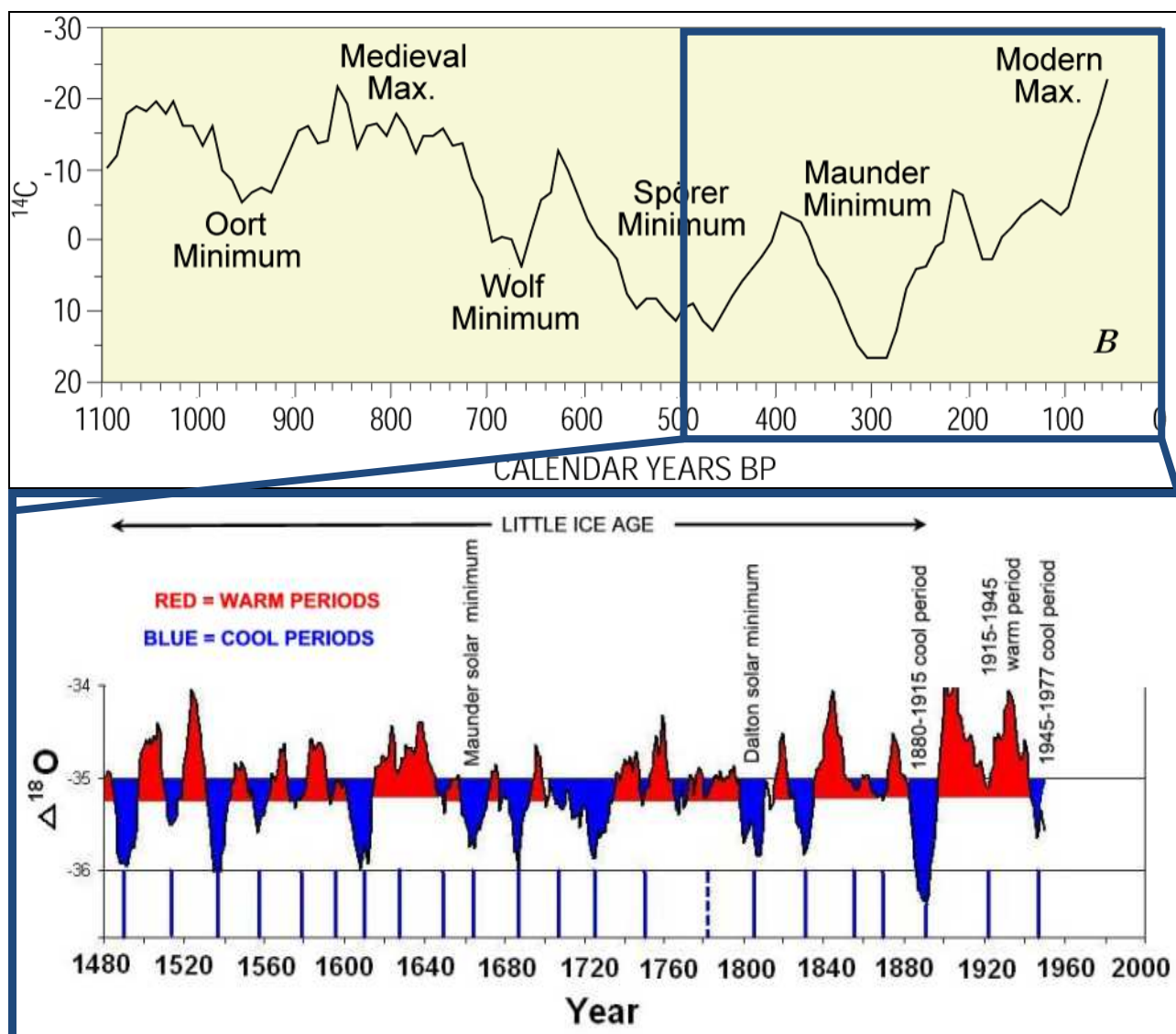


Fig. 2.3. Nell'immagine sopra, gli ultimi 1000 anni di storia climatica in Europa (ricostruiti con l'andamento dell'attività solare in base ai livelli di carbonio-14 e di berillio-10, indicatori dell'attività solare e quindi delle macchie solari) con indicati i tre "minimi" successivi al periodo caldo medievale, ovvero i tre periodi più freddi della Piccola Età Glaciale (Minimo di Wolf, Minimo di Spörer, Minimo di Maunder) (USGS, 2000). Sotto, uno zoom sugli anni della PEG, con indicati i periodi freddi e caldi.

In Europa le maggiori fasi di espansione sono state riconosciute nel 1600-1610, 1643-1653, 1680, 1690-1700, 1720, 1770, 1800 e 1850-1855 (fig. 2.3). Ma se vi è un sincronismo ormai riconosciuto a livello globale sui momenti durante i quali i ghiacciai avanzavano, sulle Alpi non appare esserci lo stesso sincronismo nell'espansione più accentuata, ovvero sul momento in cui i ghiacciai hanno raggiunto le dimensioni massime durante la PEG. Infatti, alcuni ghiacciai hanno occupato la posizione più avanzata nel XVII secolo, altri nel XVIII, altri ancora nel XIX. Anche per il Trentino, quindi, dobbiamo ammettere una mancanza di sincronismo sulle avanzate e sul momento in cui si raggiunse la massima posizione, dovuta alle diverse morfologie dei gruppi montuosi che ospitano (o hanno ospitato) corpi glaciali.

Una delle espansioni più documentate è sicuramente quella della metà del XIX secolo (1850-1855), che per molti ghiacciai alpini è stata anche la maggiore in assoluto (pur non variando eccessivamente rispetto ai massimi del XVII secolo e del 1820).

L'alpinismo e il turismo alpino stanno iniziando la loro grande stagione. Fotografie, relazioni e carte ci presentano i ghiacciai alpini con una veste che alle attuali generazioni quasi certamente non sarà dato di vedere (fig. 2.4).



Fig. 2.4. I ghiacciai della Lobbia (a sinistra) e del Mandrone (a destra) nel 1864 ritratti da Julius Payer. Oggi la fronte dei due ghiacciai si trova 1000 metri più in alto.

Sulle Alpi italiane i ghiacciai, oggi frammentati in unità minori, costituivano imponenti apparati vallivi composti, alimentati da più confluenze. Durante questa espansione, così come durante i massimi precedenti, vengono edificate le grandi creste moreniche laterali che, innalzandosi per decine di metri, costituiscono uno dei caratteri più tipici dell'attuale paesaggio delle alte valli alpine (fig. 2.5). L'identificazione, la datazione e la mappatura delle varie creste moreniche permettono non solo di ricostruire l'estensione dei ghiacciai nelle varie fasi di espansione, ma anche di determinarne con una certa approssimazione il limite delle nevi e quindi la linea di equilibrio.

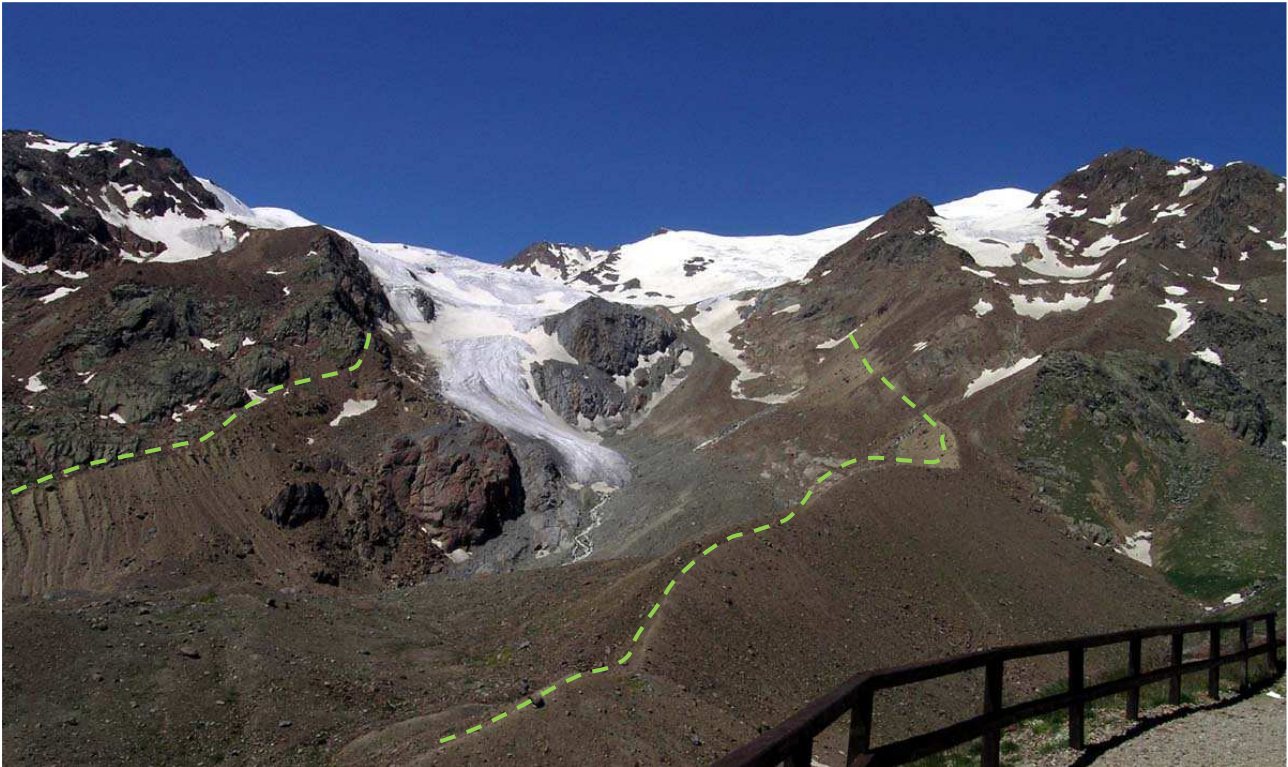


Fig. 2.5. Il Ghiacciaio di La Mare con le morene della Piccola Età Glaciale (in tratteggio verde) che indicano l'estensione del ghiacciaio nel XIX sec..

Quando si concluse la Piccola Età Glaciale? Non è certo possibile indicare una data precisa e valida per entrambi gli emisferi. Di fatto a partire dal 1860 sui ghiacciai del Monte Bianco appaiono i primi segni di un'inversione di tendenza. Qualche anno più tardi il fenomeno diventa generalizzato su tutte le Alpi. Come scrive Le Roy Ladurie (1982) "è l'inizio di un'epoca nuova", il sintomo del più grandioso fenomeno climatico globale degli ultimi 160 anni. La recessione si manifesta con arretramenti delle fronti glaciali, diminuzioni delle superfici, riduzioni di spessore, estinzione dei ghiacciai di minori dimensioni, frammentazione di lingue e separazione di colate prima confluenti. Irregolari superfici detritiche, che nascondono spesso lembi di ghiaccio morto, prendono il posto dei ghiacciai, i quali si ritirano verso i circhi più elevati.

In conclusione ci si può domandare se la situazione attuale dei ghiacciai sia inusuale nell'Olocene o sia totalmente nuova. Chiaramente i ghiacciai alpini sono stati più volte, nei

passati 10 mila anni, in condizioni ambientali naturali o, comunque, pre-industriali, anche più ridotti di quanto non lo siano attualmente. Tuttavia vanno fatte le seguenti considerazioni:

- il ritiro glaciale attualmente in corso dura ormai da oltre un secolo, si è accentuato negli ultimi decenni e non sembra volersi attenuare;
- occorre tener presente che la risposta alle sollecitazioni climatiche è rapida nel caso di piccoli ghiacciai, per i quali anche una breve fase sfavorevole al bilancio glaciale può determinarne una significativa riduzione, mentre i ghiacciai maggiori rispondono solamente (e con un ritardo di numerosi decenni o più) alle variazioni climatiche maggiori e di maggiore durata;
- in alcuni ghiacciai di piccole dimensioni le condizioni attuali sono da ritenersi del tutto nuove negli ultimi 5000 anni, e per trovare condizioni simili bisogna arretrare nel tempo a prima della Neoglaciazione;
- i ghiacciai di maggiori dimensioni sono attualmente dimensionati dalle condizioni climatiche dei decenni scorsi, e probabilmente non hanno ancora risentito del riscaldamento accentuato degli ultimi tre decenni. Ciò significa che, anche ipotizzando l'avvento di un raffreddamento climatico, i ghiacciai più grandi continueranno ad arretrare ancora per circa un decennio.

2.4 La PEG e la storia umana nelle Alpi centro-orientali

La Piccola Età Glaciale nel suo complesso non ha lasciato impronte tanto evidenti e indelebili nella storia delle popolazioni montane della nostra penisola e le labili tracce del suo passaggio devono spesso essere ricercate sotto uno spesso strato di rimodellamenti dei sistemi socioeconomici delle comunità e di continui adattamenti alle nuove evenienze.

Fra i non molti che in Italia si sono preoccupati di studiare tale periodo deve citarsi U. Monterin (1988-1990) che, per primo, con particolare riferimento alle porzioni più elevate delle Alpi occidentali, mise in luce le differenti conseguenze prodotte dalla variazione glaciale sulla realtà ambientale e umana: dall'abbassamento della fascia climatica delle conifere all'abbandono dei transiti lungo alcuni valichi alpini, dalla scomparsa di colture diffuse un tempo a quote insospettabili, alla poderosa e talora disastrosa avanzata delle masse glaciali, egli evidenziò gli effetti più durevoli fra quanti prodotti dal "peggioramento" del clima manifestatosi a partire dalla metà del XVI secolo.

Molto dopo, facendo uso di una documentazione assai più cospicua, Le Roy Ladurie (1982) poté tracciare un quadro affascinante delle vicende che interessarono in questi secoli diversi segmenti dell'arco alpino e altre regioni dell'Europa centro-occidentale. In questo studio il riferimento all'area italiana risultò tuttavia limitato al solo territorio valdostano, mentre andò totalmente escluso ogni approfondimento relativo ai restanti settori alpini e prealpini meridionali.

Nelle vallate francesi del Monte Bianco, nel Vallese e in altre aree delle Alpi svizzere e austriache invece, l'interesse degli studiosi fu attratto innanzitutto dalla presenza di numerosi documenti e di un sapere orale testimoniante gli spaventevoli effetti dell'avanzata delle lingue glaciali site, talvolta ancor'oggi, a vista di insediamenti umani permanenti (i ghiacciai di Taconnaz, Des Bossons, la Mer de Glace e l'Argentière nella Valle di Chamonix, il Ghiacciaio del Rodano nel vallone di Gletsch, i ghiacciai di Grindelwald Superiore e Inferiore nell'omonima valle, ecc.).

Sulle montagne trentine non vi è stata quella grande e marcata attenzione che invece vi era sui settori occidentali, mancanza di attenzione dovuta, forse, ad uno sviluppo altitudinale più modesto rispetto ai grandi massicci del Monte Bianco e del Monte Rosa. O forse anche perché le fronti glaciali non hanno mai bussato alle porte dei villaggi, come invece accadeva in Valle d'Aosta, Svizzera e Francia, restando invece più confinati all'interno delle valli. Nonostante ciò, le montagne trentine rinserrano alcuni fra i più estesi ghiacciai italiani. Qui la presenza di estesi sub-pianori, o di un vero e proprio altopiano nel caso del Ghiacciaio dell'Adamello, a quote abbastanza elevate (attorno ai 3.000 metri), e di condizioni climatiche sfavorevoli al glacialismo rispetto al versante nord delle Alpi, determina il notevole ampliarsi delle superfici ghiacciate in quota e, contemporaneamente, un loro limitato sviluppo verso valle. In questi settori, come testimoniano i notevoli edifici morenici abbandonati al termine della PEG, i ghiacciai giunsero solo raramente a lambire luoghi di presenza, anche solo stagionale, di attività umane. Le stesse vie di transito, a quanto è finora dato sapere, evitavano qui di spingersi a quote e in siti minacciati dalla presenza di ghiacciai o resi durante la PEG impraticabili dal prolungato persistere delle nevi o dalla neoformazione di masse glaciali.

Nelle valli trentine, le caratteristiche morfologiche delle masse glaciali, diretta conseguenza delle peculiarità del rilievo e delle condizioni climatiche, hanno in qualche maniera impedito uno stretto contatto tra l'uomo e i suoi elementi antropici ed i ghiacciai. Le variazioni di questi ultimi non dovevano quindi essere oggetto di preoccupate attenzioni né, per ciò stesso, si motivava l'esigenza di atti scritti, amministrativi o religiosi, ad essi inerenti.

Quali che siano i segni lasciati nella storia dell'uomo, ciò che si impone con certezza, se non altro per la generalizzata presenza degli apparati morenici sei-ottocenteschi, è l'esistenza di una fase, i cui precisi limiti temporali restano da definirsi. Gli esiti delle poche ricerche condotte sull'argomento sembrano avallare la tesi di un disordinato succedersi, a partire dalla metà circa del XVI secolo, di climi più umidi nelle stagioni di accumulo dei ghiacciai o più freddi nella stagione estiva rispetto all'attuale e ai decenni o secoli precedenti, intervallati da fasi di mutevole durata più secche e/o calde a seguito delle quali i ghiacciai fecero registrare regressi localmente anche significativi.

3. METODI

3.1 Ricostruzione della massima estensione dei ghiacciai del Trentino nella Piccola Età Glaciale

Al fine di ricostruire l'estensione massima dei ghiacciai trentini durante la PEG è stato dato un forte peso all'attività di rilevamento geomorfologico su terreno. Per poter meglio comprendere le dinamiche glaciali ci si è voluti dapprima focalizzare sulle zone d'alta quota attualmente glacializzate rappresentate dai gruppi montuosi del Cevedale, dell'Adamello-Presanella, del Brenta e della Marmolada. Qui il rilevamento è iniziato nel luglio 2014, a stagione estiva inoltrata, per poter accedere ed osservare queste aree nel periodo in cui risultano essere per lo più scoperte da neve.

Si è quindi andati alla ricerca delle testimonianze lasciate sul terreno dai ghiacciai della PEG, testimonianze rappresentate da morene e depositi glaciali, forme e sedimenti ancora freschi e per nulla o comunque poco pedogenizzati, vegetati e/o colonizzati da licheni.

Sono state comprese all'interno delle aree glacializzate della PEG anche le aree oggi occupate da rock glacier attivi ritenuti derivare dall'evoluzione di un ghiacciaio ridotto in dimensioni e successivamente ricoperto da detrito di versante (ice-cored rock glacier).

Dalle zone oggi maggiormente glacializzate ci si è poi spostati in quelle aree dove i ghiacciai sono ancora presenti solo in piccole unità o sono del tutto scomparsi, rappresentate dai gruppi montuosi del Catinaccio, dei Monzoni, delle Pale di San Martino, del Pasubio e del Carega.

Sul campo sono stati cartografati i limiti che delineano l'estensione massima raggiunta dai ghiacciai durante la PEG, rappresentati da creste di morene frontali e/o laterali, depositi glaciali e rock glacier attivi.

Utile nel rilevamento geomorfologico su terreno si è verificato essere l'utilizzo di strumentazione GPS per fissare su mappa digitale Waypoints e Tracks afferenti a questi limiti.

Quando le aree investigate risultavano difficilmente raggiungibili e/o ogniqualvolta fosse necessaria una visione d'insieme si è ricorsi al rilevamento da un punto panoramico. Il lavoro cartografico di campagna è stato quindi tutto trasferito su piattaforma GIS (vedi § 3.4).

Tutto ciò è servito ad elaborare un modello concettuale della dinamica glaciale trentina a seconda di diverse variabili quali il substrato geologico (cristallino o carbonatico), la fascia latitudinale (Trentino meridionale piuttosto che zone di confine, decisamente più elevate come quota e più facilmente influenzate dalle perturbazioni fredde e umide provenienti da nord) e l'esposizione dei versanti; ciò ha permesso di confrontare le quote alle quali i ghiacciai si sono spinti durante la PEG, quote che per ghiacciai dalle medesime caratteristiche dovrebbero coincidere.

Il rilevamento diretto su terreno è stato affiancato dal telerilevamento. Le forme ed i depositi afferenti alla PEG sono state riconosciute anche, o talvolta solamente, attraverso l'interpretazione a video delle immagini ortofoto 2006 e delle immagini Lidar 2003. Sono inoltre state consultate attraverso lettura stereoscopica le foto aree risalenti ai voli 1980 e 1983.

Per agevolare la digitalizzazione a video dei limiti è stata inoltre scannerizzata e georeferenziata la cartografia geologica e geomorfologica del Trentino disponibile in bibliografia. Nella cartografia CARG (foglio 024 Bormio, foglio 025 Rabbi, tavola 25 III Rabbi, foglio 026 Appiano, tavola 26 III Fondo, foglio 028 La Marmolada, foglio 042 Malè, tavola 42

III Madonna di Campiglio, tavola 42 IV Peio, foglio 043 Mezzolombardo, tavola 45 III S. Martino di Castrozza, foglio 058 Monte Adamello, foglio 059 Tione di Trento, foglio 060 Trento, foglio 080 Riva del Garda, tavola 80 IV Roncone, foglio 082 Asiago) sono cartografati come unità quaternarie indistinte i depositi di contatto glaciale, il till indifferenziato (deposito glaciale), i cordoni morenici e i rock glacier. Nella Carta geomorfologica dell'Alta Val di Peio (Gruppo del Cevedale), nella Carta geomorfologica dell'Alta Valle di Saent (Valle di Rabbi, Gruppo Ortles-Cevedale) e nella Carta geomorfologica dell'Alta Val di Genova (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali), le forme di accumulo ed i depositi sono invece distinti con maggior dettaglio tra olocenici attivi/non attivi e pleistocenici. La carta contenuta all'interno del volume *I Ghiacciai del Gruppo Ortles-Cevedale* pubblicato da Ardito Desio tra il 1967 e il 1968, che riporta la posizione delle fronti dei ghiacciai dal 1865 al 1961 e la distribuzione dei cordoni morenici, è stata impiegata per gli studi in quest'area.

Utile è risultato poi il reperimento di immagini e fotografie storiche con la rappresentazione dei ghiacciai delle aree di interesse per ricostruire sia la posizione massima raggiunta dagli stessi durante la PEG ma anche, e soprattutto, la loro evoluzione.

Sulla base di tutte queste informazioni sono stati digitalizzati a video in scala 1:2.000 i limiti lineari della PEG, distinti a seconda della tipologia in cresta di morena, deposito glaciale e rock glacier. A partire da questi limiti e sulla base dell'interpretazione morfologica sono poi stati ricostruiti i limiti in forma poligonale dei ghiacciai, limiti che ricalcano l'estensione che essi avevano nella loro massima espansione raggiunta durante la PEG.

Come indicato nel Cap. 2, non vi è stato un momento sincrono nel quale i ghiacciai hanno assunto la posizione più avanzata, posizione che è stata invece raggiunta in momenti diversi a seconda del ghiacciaio e della sua morfologia. Questo studio si pone l'obiettivo di determinare la posizione massima raggiunta nella PEG senza giungere alla definizione del momento in cui è stata raggiunta, cosa che richiederebbe studi che esulano dalla natura del presente lavoro. Resta comunque il fatto che la PEG sia iniziata nel 1590 circa e si sia conclusa nel 1850-55, ed è in questo periodo che le morene e i depositi glaciali cartografati sono stati messi in posto (per molti ghiacciai l'espansione del 1850-55 è stata la maggiore in assoluto).

3.2 Evoluzione dei ghiacciai del Trentino dalla Piccola Età Glaciale ad oggi.

Documenti utilizzati

Partendo dalla ricostruzione dello stato dei ghiacciai trentini durante la PEG, si è voluto ripercorrere la loro evoluzione fino ai giorni nostri recuperando tutti i dati ad oggi disponibili in bibliografia.

Il primo di questi è rappresentato dall'*Elenco dei Ghiacciai Italiani* pubblicato nel 1925 dall'Ufficio Idrografico del Po, monografia statistica del Generale Carlo Porro "redatta secondo il programma e sotto gli auspici del Comitato Glaciologico Italiano", il primo censimento ufficiale dal quale è stato possibile estrapolare il nome degli 82 corpi glaciali allora riconosciuti in Trentino. Nel 1927 il Comitato Glaciologico Italiano (CGI), in collaborazione con l'Istituto Geografico Militare, pubblica la prima parte dell'*Atlante dei Ghiacciai Italiani* curato da Carlo Porro e da Pietro Labus. Si tratta di quattro tavole alla scala 1:500.000 dove sono individuati i gruppi montuosi delle Alpi e dell'Appennino in cui ricadono le masse glaciali italiane, ma senza riportarne i limiti.

Ma il primo vero dato utile alla ricostruzione degli areali, in quanto i ghiacciai compaiono unitamente a elaborati cartografici, è rappresentato dal *Catasto dei Ghiacciai Italiani*, frutto della collaborazione tra il Comitato Glaciologico Italiano ed il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e pubblicato in quattro volumi tra il 1959 ed il 1962 sotto il coordinamento scientifico di Giuseppe Nangeroni (verrà presa come data di riferimento il 1958, anno in cui sono state compilate, da parte degli operatori, le schede originali per ogni singolo ghiacciaio). In particolare, i volumi che descrivono i ghiacciai trentini sono il *Volume III – Ghiacciai della Lombardia e dell'Ortles-Cevedale* del 1961 ed il *Volume IV – Ghiacciai delle Tre Venezie e dell'Appennino* del 1962. Per ogni ghiacciaio, a quel tempo esistente o scomparso tra il 1910 e il 1958, viene fornita una scheda descrittiva corredata di una cartina topografica al 25.000 con la delimitazione del ghiacciaio e in genere da una fotografia. È necessario far presente che il limite dei corpi glaciali all'interno di questo catasto è stato tracciato a mano libera, alla scala 1:25.000, senza aver eseguito nessun rilievo topografico sul terreno. Pertanto sono possibili errori di graficismo riguardanti soprattutto la delimitazione a monte del ghiacciaio o di isole rocciose.

Tutte le cartine raccolte in questi due volumi sono state scannerizzate e georeferenziate al fine di poter digitalizzare i poligoni dei ghiacciai in ambiente GIS. Nonostante i possibili, e in alcuni casi riconosciuti, errori poco sopra citati, si è preferito procedere alla delimitazione dei ghiacciai senza apportare nessun tipo di correzione e quindi rappresentandoli così come il rilevatore del CGI li ha riportati sulla cartografia del Catasto.

Il secondo dato utile è rappresentato dal catasto SAT del 1987 realizzato dal Comitato Glaciologico Trentino (CGT) della Società degli Alpinisti Tridentini (SAT), eseguito da operatori del Comitato mediante ricognizioni in sito e trascrizioni su cartografie in scala 1:25.000 in seguito digitalizzate.

Il dato successivo è rappresentato dal catasto PAT del 2003 realizzato su base dei rilievi Lidar aerei 2003 dai quali sono poi state ricavate le perimetrazioni in scala 1:1.000 ed il modello digitale di superficie (DSM).

L'ultimo dato, il più recente, è rappresentato dal catasto PAT-Muse 2013 (dati non ancora pubblicati). La digitalizzazione dei limiti dei ghiacciai è stata resa possibile grazie al supporto dell'Ufficio Previsione e Organizzazione della PAT, nella figura del dott. Alberto Trenti, insieme al dott. Christian Casarotto del Muse. La perimetrazione è stata eseguita sulla base dei rilievi Lidar 2013, dato utile a condurre, a confronto con il dato Lidar 2003, anche indagini volumetriche, risultati che però si discostano dagli obiettivi del presente lavoro e quindi qui non presentati.

L'evoluzione dei ghiacciai del Trentino è stata dunque ricostruita fotografando il loro stato in 5 differenti momenti:

- espansione massima raggiunta durante la PEG che, nonostante come detto sopra sia avvenuta in periodi diversi a seconda del ghiacciaio considerato, ai fini di questo lavoro viene associata all'anno 1850, momento in cui termina anche la PEG e che per molti ghiacciai coincide con la fase di massima espansione;
- 1958 - Catasto dei Ghiacciai Italiani;
- 1987 - Catasto SAT;
- 2003 - Catasto PAT;
- 2013 – Catasto PAT-Muse.

3.3 Problematiche

L'attività di rilevamento su campo ha evidenziato come talvolta alcune forme e/o depositi come morene, rock glacier e depositi della PEG, interpretati come tali da lontano o tramite telerilevamento, possano poi rivelarsi, una volta osservate da vicino, tutt'altra cosa (è il caso ad esempio di un paravalanghe scambiato per morena, fig. 3.1) oppure appartenere in realtà a fasi antecedenti la PEG (per un'errata stima del livello di copertura vegetale, lichenica o pedogenetica).

Anche il confronto, durante il rilevamento su campo, tra la situazione reale e l'immagine ortofoto o lidar, ha evidenziato come la sola immagine può talvolta trarre in inganno ed essere così mal interpretata. Sulla base di ciò, dal momento che non tutte le aree sono state rilevate direttamente (causa la tempistica nonché le avverse condizioni meteo dell'estate 2014) ma analizzate sulla base dell'interpretazione di foto aeree e lidar, è corretto ammettere un certo grado di errore dovuto appunto ad una possibile errata interpretazione del telerilevamento.



Fig. 3.1. Dosso paravalanghe interpretato, da lontano, come morena. La morena messa in posto durante la PEG si trova in prossimità del dosso e quindi con essa facilmente confondibile.

Qualche difficoltà si è avuta nel delimitare i poligoni dei ghiacciai nelle zone a monte e sotto cresta; in queste zone, specie su substrato carbonatico, le morfologie glaciali non sono più riconoscibili perché cancellate da successivi processi erosivi oppure perché completamente obliterate da successivi depositi come il detrito di versante.

Occorre poi fare qualche osservazione sui rock glacier compresi all'interno delle aree glacializzate della PEG. Si è deciso innanzitutto di tralasciare i rock glacier non più attivi, con massi lichenizzati e/o pedogenizzati in quanto, considerando il tempo per lo sviluppo della copertura lichenica e pedogenetica, si ritiene non lo fossero nemmeno 150 anni fa. Tra quelli attivi, si è cercato di fare distinzione tra quelli legati alla presenza di permafrost (*ice-cemented rock glacier*) e quelli che possono invece rappresentare l'evoluzione di un ghiacciaio; solo questi ultimi sono stati inclusi negli areali della PEG.

Per quanto riguarda il Trentino meridionale, ovvero nei gruppi del Pasubio e del Carega, nessuno studio ha mai ammesso la presenza di ghiaccio in queste aree durante la PEG. Sono state tuttavia individuate forme e depositi glaciali plausibilmente riconducibili a tale periodo. Questi sono stati cartografati con limiti "incerti" nel Gruppo del Carega mentre si è preferito per il momento non cartografare nulla nel Gruppo del Pasubio dove l'ambiente è fortemente segnato dall'alterazione che colpisce le rocce del substrato roccioso carbonatico nonché dagli eventi bellici che qui si sono succeduti, e pertanto di difficile interpretazione. Dopo aver condotto rilievi nelle zone attualmente glacializzate e dopo essere riusciti a costruire un quadro generale dell'estensione del glacialismo durante la PEG, si può affermare che nei gruppi trentini con un'elevazione decisamente più contenuta e posti più a sud, la presenza di ghiacciai durante la PEG è da escludersi o, tutt'al più, da considerarsi limitata a pochi e piccoli apparati (come ad esempio un ghiacciaio nel Gruppo del Carega e pochi altri nel Gruppo di Cima d'Asta).

La comprensione del glacialismo relativo alla PEG nel Trentino meridionale potrebbe essere migliorata integrando gli studi geomorfologici con studi di tipo botanico o zoologico, come ad esempio il riconoscimento nel suolo o fra le rocce di particolari insetti indicatori di periodi freddi che confermerebbero la presenza in passato di corpi glaciali in queste aree.

La ricostruzione dell'evoluzione dalla PEG ad oggi, con la sovrapposizione dei layer afferenti ai 5 momenti temporali considerati in questo studio (1850, 1958, 1987, 2003, e 2013), ha messo in evidenza alcune incongruenze a livello dei limiti del 1958 e del 1987:

- limiti del 1987 situati più a valle o esterni a quelli del 1957 che indicano ghiacciai più estesi in tempi recenti che non nel passato,
- limiti di ghiacciaio non congrui con i limiti dei bacini idrografici di riferimento.

Come detto in precedenza, va considerato che tali limiti derivano da trascrizioni manuali su cartografie al 25.000 e quindi suscettibili di errore. Nessuno di tali limiti è stato comunque corretto non avendo a disposizione elementi per apportare le modifiche.

3.4 Digitalizzazione in ambiente GIS. Struttura ed organizzazione del geo-database

Tutti i dati geografici e le informazioni che descrivono l'evoluzione dei ghiacciai trentini dalla PEG ad oggi sono stati raccolti all'interno del Personal Geodatabase **Ghiacciai PEG-2013.mdb** creato con il software ArcGIS 10.1 e inserito nel DVD allegato. Esso comprende 8 Feature Class: una puntuale, una lineare e sei poligonali.

In ogni Feature Class gli elementi spaziali sono memorizzati all'interno di una tabella (feature table) dove ciascun oggetto spaziale determina un record (riga) della tabella stessa. Gli attributi, spaziali e non, relativi agli elementi geometrici vengono memorizzati in colonne.

Tutte le entità geometriche sono state digitalizzate adottando la proiezione universale trasversa di Mercatore, o "proiezione conforme di Gauss", e come ellissoide di riferimento il World Geodetic System 1984 (UTM-WGS84).

Lo Shapefile **limiti_PEG**, creato per descrivere i limiti che delineano l'estensione massima raggiunta dai ghiacciai durante la PEG, è caratterizzato dai seguenti campi o attributi (Fields):

- OBJECTID: codice identificativo numerico (assegnato in automatico dal software)
- Shape: definisce la geometria della Feature Class, in questo caso Polyline (default)
- Shape_Length: definisce la lunghezza dell'oggetto spaziale in metri (default)
- GRADO_INC: descrive il grado di incertezza attribuito al limite sulla base dell'affidabilità del rilevamento; esso è distinto tra
 - certo
 - incerto
- TIPO_RIL: descrive la principale tipologia di rilevamento attraverso la quale il limite è stato riconosciuto, differenziandola tra
 - rilevamento diretto sul terreno
 - rilevamento sul terreno da punto panoramico
 - rilevamento da cartografia geomorfologica
 - solo telerilevamento
- TIPO_LIMITE: definisce la tipologia di limite differenziandola tra
 - cresta di morena
 - deposito glaciale
 - rock glacier attivo
- Gr_mont: identifica il gruppo montuoso in cui è situato il limite, distinto tra
 - Cevedale
 - Presanella
 - Dolomiti di Brenta
 - Adamello
 - Marmolada
 - Pale di San Martino
 - Catinaccio
 - Monzoni
 - Pasubio
 - Carega
 - Cima d'Asta

Lo Shape **ghiacciai_PEG**, creato per rappresentare i poligoni dei ghiacciai afferenti alla PEG, è caratterizzato dai seguenti Fields:

- OBJECTID
- Shape: Polygon
- Shape_Length
- Shape_Area: definisce la superficie dell'oggetto spaziale in m² (default)
- CODE_CGI: identifica l'oggetto spaziale rispettando la nomenclatura adottata dal Comitato Glaciologico Italiano e quindi riportata nei diversi catasti

- **EVOLUZIONE:** definisce la condizione attuale dell'oggetto presente durante la PEG e quindi la sua evoluzione, distinguendola tra
 - ghiacciaio
 - ghiacciaio estinto
 - rock glacier attivo, riferendosi con tale termine ad un rock glacier attivo ritenuto derivare dall'evoluzione di un ghiacciaio ridotto in dimensioni e successivamente ricoperto da detrito di versante
 - forma mista, intendendo con tale termine un ghiacciaio che sta evolvendo in rock glacier
- **GRADO_INC:** descrive il grado di incertezza attribuito al poligono sulla base dell'affidabilità del rilevamento, distinguendolo tra
 - certo
 - incerto
- **Gr_mont**
- **Quota_min:** indica la quota minima del ghiacciaio, ovvero la quota alla quale si trova la fronte; essa è stata determinata tramite modello digitale del terreno con risoluzione 3x3 metri

Lo Shape **ghiacciai_1958**, creato per descrivere il Catasto dei Ghiacciai Italiani 1961-1962 è caratterizzato dai seguenti Fields:

- OBJECTID
- Shape: Polygon
- Shape_Length
- Shape_Area
- CODE_1958: codice attribuito al ghiacciaio secondo tale catasto
- NAME_1: nome principale del ghiacciaio
- NAME_2: nome secondario del ghiacciaio
- Gr_mont
- Quota_min

Lo Shape **ghiacciai_1958_estinti**, creato per rappresentare separatamente quei ghiacciai dichiarati estinti nei volumi III e IV del Catasto dei Ghiacciai Italiani 1961-1962, è caratterizzato dai seguenti Fields:

- OBJECTID
- Shape: Point
- CODE_1958
- NAME_1
- NAME_2
- Gr_mont

Va specificato che sono stati considerati come estinti tutti i ghiacciai che, accanto al nome e al codice del ghiacciaio, riportano la dicitura "Estinto" e quelli che, pur non riportando tale dicitura, sono indicati nella cartografia con una "X".

Lo Shape **ghiacciai_1987** è caratterizzato dai seguenti Fields:

- OBJECTID
- Shape: Polygon
- Shape_Length
- Shape_Area
- CODICE: codice attribuito al ghiacciaio secondo tale catasto
- NOME: (rispetto a quanto riportato nello shape originale sono stati aggiunti alcuni nomi mancanti ricavati dal sito del Comitato Glaciologico Trentino)

Allo shape originale sono stati aggiunti i seguenti campi:

- Gr_mont
- Quota_min_3x3

Lo Shape **ghiacciai_2003**, è caratterizzato dai seguenti Fields:

- OBJECTID
- Shape: Polygon
- Shape_Length
- Shape_Area
- CODICE: codice attribuito al ghiacciaio secondo tale catasto
- NOME

Allo shape originale sono stati aggiunti i seguenti campi:

- Gr_mont
- Quota_min

Lo Shape **ghiacciai_2003_min**, è caratterizzato dai seguenti Fields:

- OBJECTID
- Shape: Polygon
- Shape_Length
- Shape_Area
- DERIVA_DA: codice e nome del ghiacciaio da cui il ghiacciaio minore deriva
- NOTE
- COME_CLASS
- Gr_mont

Alcuni ghiacciai minori 2003 coincidono con alcuni ghiacciai 2003.

Lo Shape **ghiacciai_2013**, dati non ancora pubblicati, è caratterizzato dai seguenti Fields:

- OBJECTID
- Shape: Polygon
- Shape_Length
- Shape_Area
- CODICE: codice attribuito al ghiacciaio secondo tale catasto
- NOME

Allo shape originale sono stati aggiunti i seguenti campi:

- Gr_mont
- Quota_min

4. RISULTATI. PEG, 1958, 1987, 2003 E 2013

4.1. Areali

4.1.1. Inquadramento generale

La digitalizzazione in ambiente GIS ha permesso di determinare l'estensione superficiale complessiva presente nel territorio provinciale nei diversi momenti considerati, ovvero nel massimo della PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013. Dai quasi 113 km² presenti nel massimo della PEG si è giunti oggi a 32,2 km² (fig. 4.1).

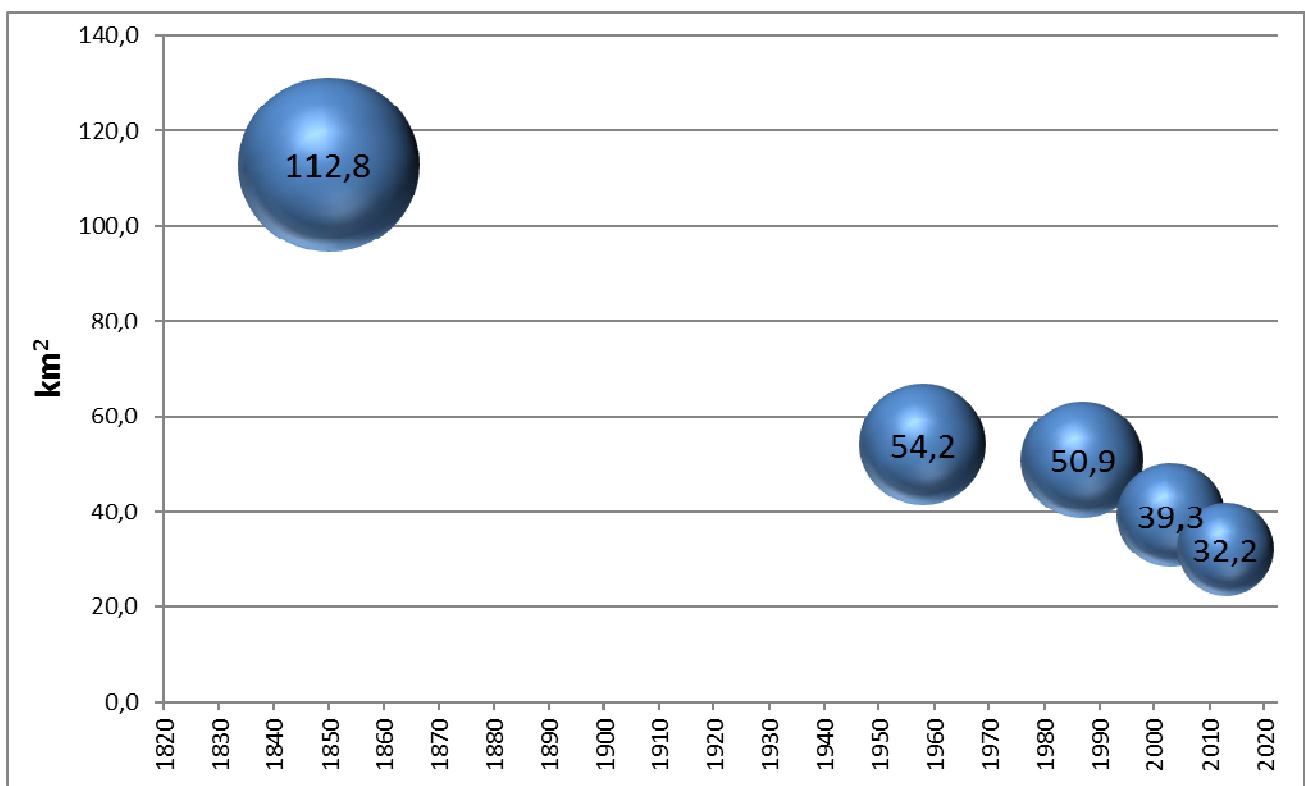


Fig. 4.1 Evoluzione dell'estensione areale dei ghiacciai trentini nel massimo della PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013. La grandezza dei cerchi è proporzionale alla superficie glaciale presente in quel momento.

Va specificato che nell'indagine statistica qui condotta non sono stati considerati i ghiacciai minori 2003, in quanto alcuni di essi compaiono anche nello shapefile ghiacciai 2003 e comunque la loro limitata estensione non va ad inficiare il valore dei dati estrapolati.

Dal massimo della PEG si è avuta una perdita del 71,4% della superficie, riduzione che si era leggermente attenuata nel periodo 1958-1987. Nel 1958 si era già persa la metà della superficie glaciale presente nella PEG (fig. 4.2).

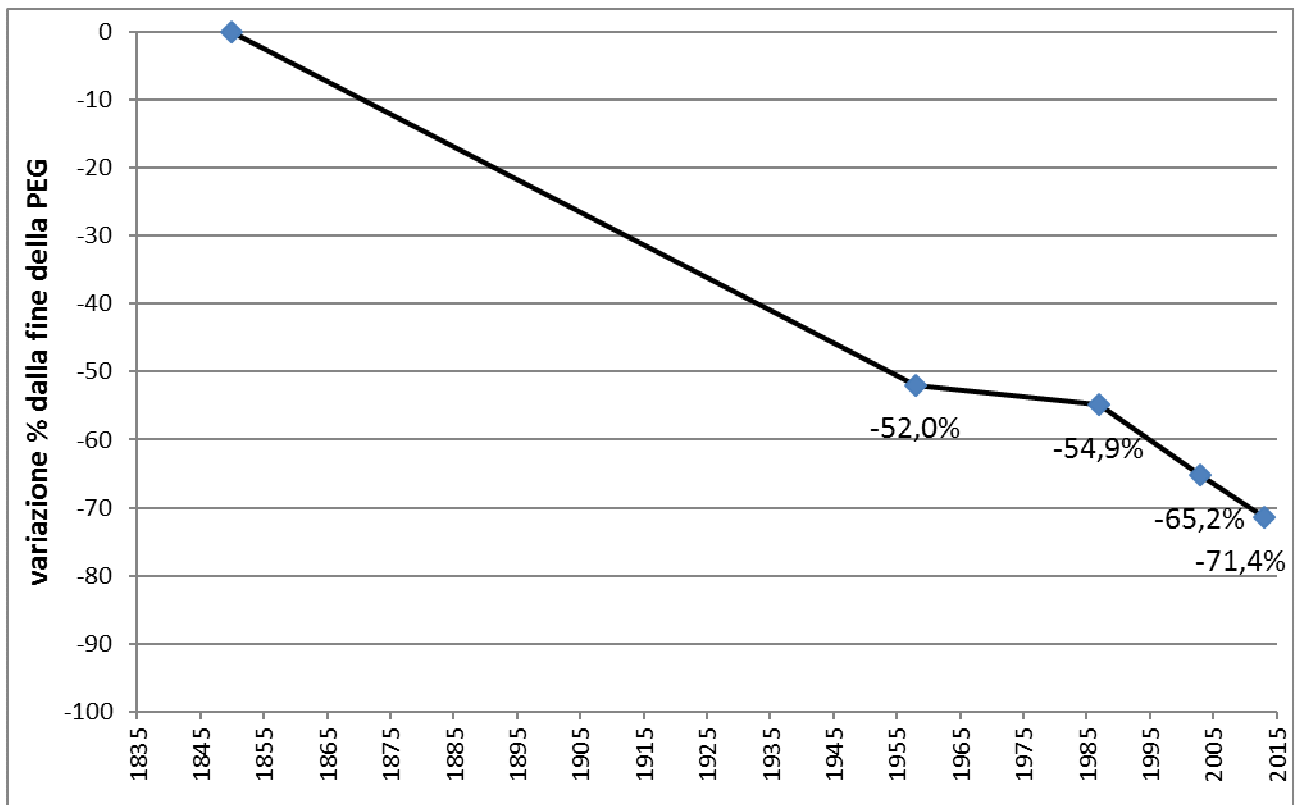
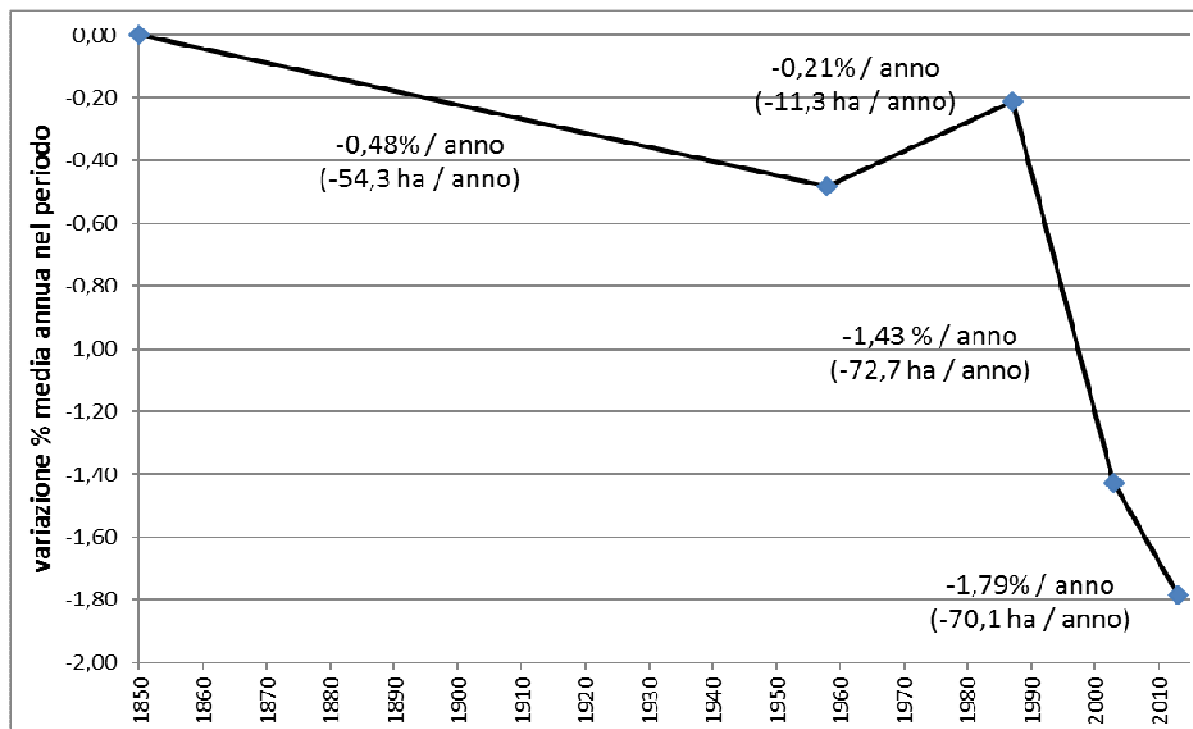


Figura 4.2. Variazione % della superficie dei ghiacciai rispetto all'estensione presente nel massimo della PEG.

Per meglio comprendere come i diversi periodi abbiano influenzato sulle variazioni delle masse glaciali, sono state calcolate le variazioni percentuali medie annue nei diversi periodi ($S\% y^{-1}$) tra l'inizio e la fine di ogni periodo (fig. 4.3).



year	Δy	S (Km ²)	ΔS (km ²)	$\Delta \bar{S} y^{-1}$ (Km ²)	ΔS % rispetto PEG	$\Delta S\%$ nel periodo	$\Delta \bar{S}\% y^{-1}$ nel periodo
1850		112,8					
	108		-58,6	-0,543		-52,0	-0,48
1958		54,2			-52,0		
	29		-3,29	-0,113		-6,1	-0,21
1987		50,9			-54,9		
	16		-11,63	-0,727		-22,9	-1,43
2003		39,3			-65,2		
	10		-7,01	-0,701		-17,9	-1,79
2013		32,2			-71,4		

Δy = intervallo, in numero di anni, tra un periodo e l'altro

S (km²) = estensione in km² presente in quel dato momento

ΔS (km²) = variazione superficiale tra un periodo e l'altro

$\Delta \bar{S} y^{-1}$ (km²) = variazione superficiale media annua tra un periodo e l'altro

ΔS % rispetto PEG = variazione percentuale della superficie rispetto all'estensione presente nel massimo della PEG

$\Delta S\%$ nel periodo = variazione percentuale della superficie tra un periodo e l'altro

$\Delta \bar{S}\% y^{-1}$ nel periodo = variazione percentuale media annua della superficie tra un periodo e l'altro

Figura 4.3. Variazioni percentuali medie annue e variazioni medie annue () considerando la superficie presente all'inizio e alla fine di ogni periodo e tabella riepilogativa.

Da ciò emerge come la massima riduzione superficiale media annua si sia verificata nel periodo 1987-2003, quando le masse glaciali si riducevano mediamente di quasi 73 ettari ogni anno (con una riduzione percentuale media annua pari a 1,43%). Rispetto a tale periodo nel decennio 2003-2013 la riduzione areale è stata più contenuta (70 ettari/anno), periodo in cui si è perso il 17,9% del ghiaccio presente all'inizio di questo periodo (2003) e quindi l'1,79% annuo. La minima riduzione superficiale si è invece avuta nel periodo 1958-1987, anni in cui i ghiacciai hanno segnato qualche piccola avanzata.

Il fenomeno è osservabile nel grafico osservando il coefficiente angolare (pendenza) delle singole rette.

4.1.2 Analisi statistica nei diversi gruppi montuosi del Trentino

Da una visione globale si passa ora a illustrare l'evoluzione degli areali nei diversi gruppi montuosi, quali Cevedale, Presanella, Adamello settore trentino, Dolomiti di Brenta, Marmolada e Pale di San Martino. Come unità di misura sarà utilizzato l'ettaro.

Nonostante nella PEG vi fossero ghiacciai anche nei gruppi del Catinaccio, Cima d'Asta e Carega, per essi non è possibile tracciare un quadro evolutivo dal momento che si assiste ad una loro possibile estinzione ancora nei primi decenni del 1900.

Cevadale

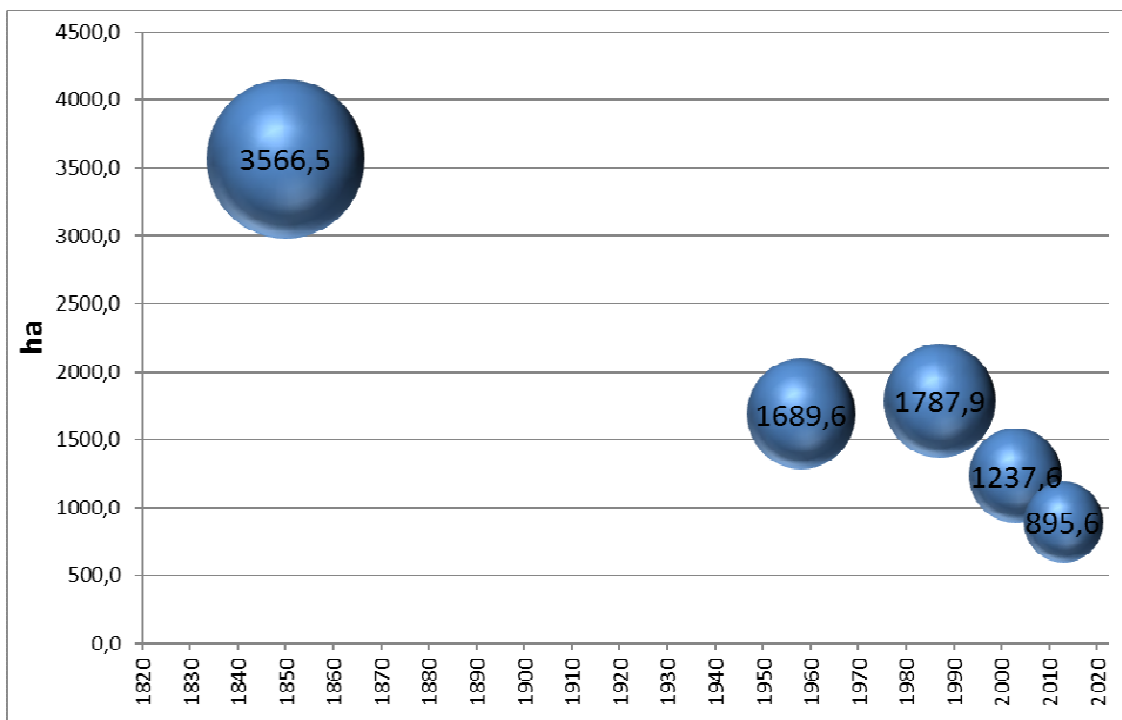


Fig. 4.4. Estensione superficiale in ettari nel massimo della PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013.

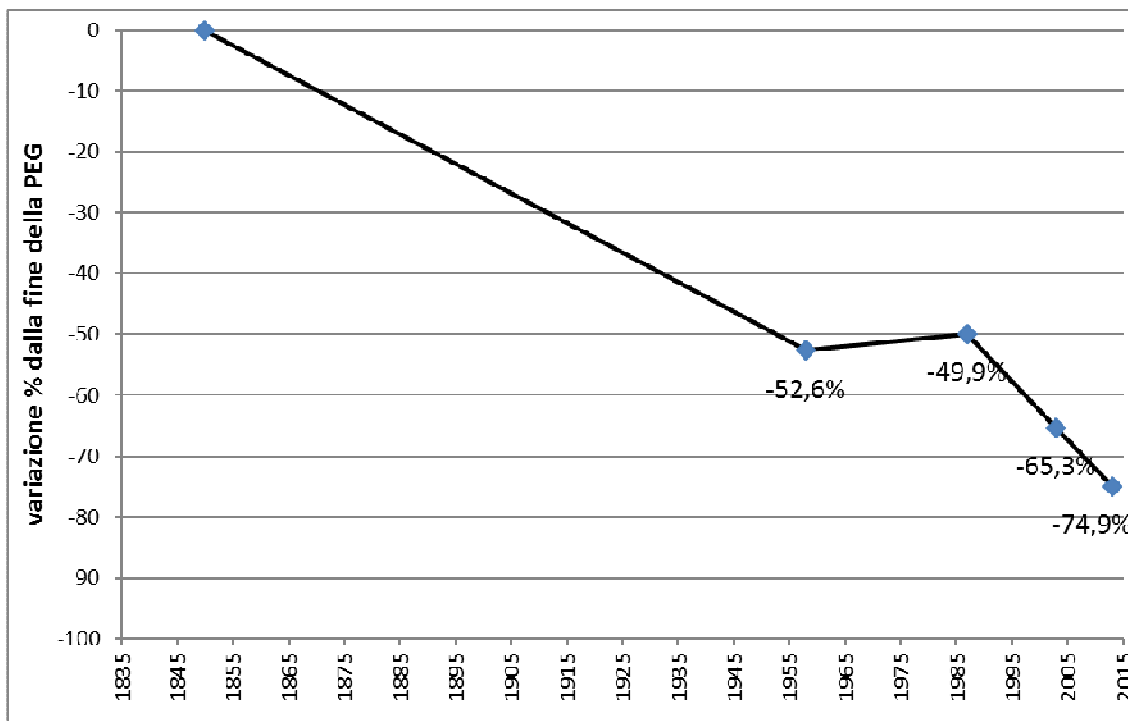
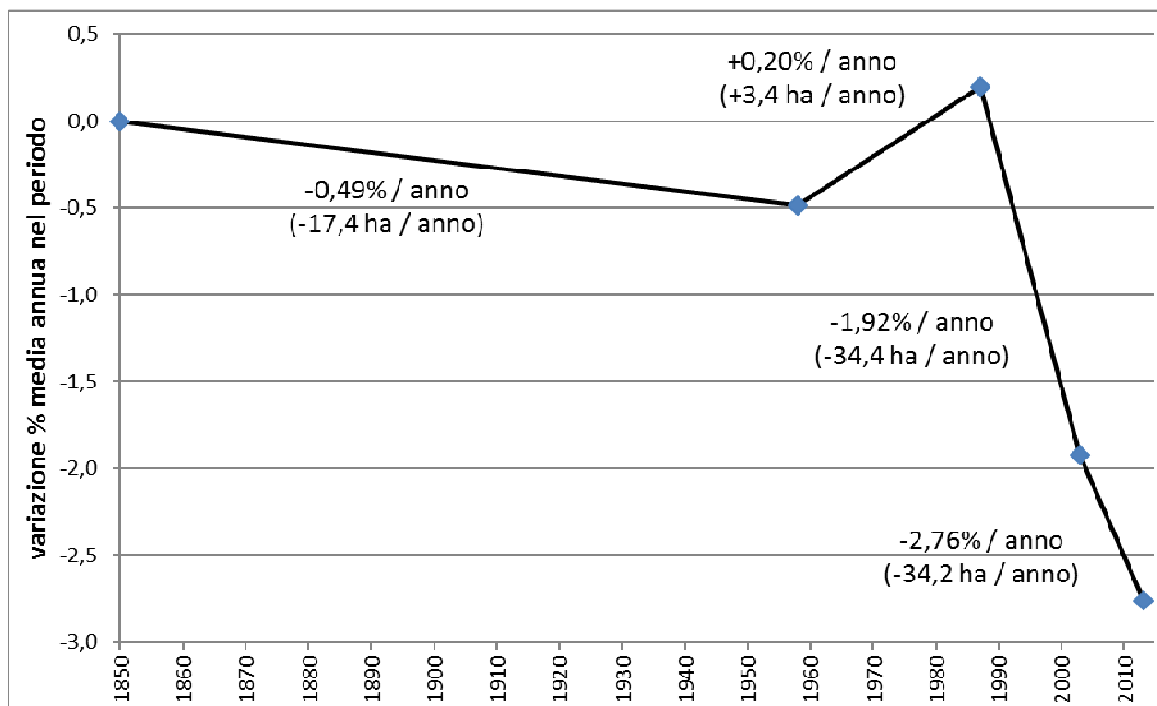


Fig. 4.5. Variazione percentuale della superficie glaciale rispetto all'estensione presente nel massimo della PEG.



year	Δy	S (ha)	ΔS (ha)	$\Delta \bar{S} y^{-1}$ (ha)	$\Delta S\%$ rispetto PEG	$\Delta S\%$ nel periodo	$\Delta \bar{S}\%$ y^{-1} nel periodo
1850		3566,5					
	108		-1876,9	-17,4		-52,6	-0,49
1958		1689,6			-52,6		
	29		98,2	3,4		5,8	0,20
1987		1787,9			-49,9		
	16		-550,2	-34,4		-30,8	-1,92
2003		1237,6			-65,3		
	10		-342,0	-34,2		-27,6	-2,76
2013		895,6			-74,9		

Fig. 4.6. Variazione percentuale media annua e variazione media annua () in ciascun periodo (PEG-1958, 1958-1987, 1987-2003 e 2003-2013) e tabella riepilogativa.

Dalla fine della PEG nel Gruppo del Cevedale si è perso il 74,9% dell'area glaciale presente in quel momento. Dopo una fase positiva registrata nel periodo 1958-1987, durante il quale i ghiacciai del Cevedale avanzavano mediamente di 3,4 ha all'anno (+0,2 % annuo), vi è stato un continuo arretramento, più marcato nel 1987-2003 (-34,4 ha/anno), contro i -34,2 ha/anno dell'ultimo periodo 2003-2013 (figg 4.4-4.6).

Presanella

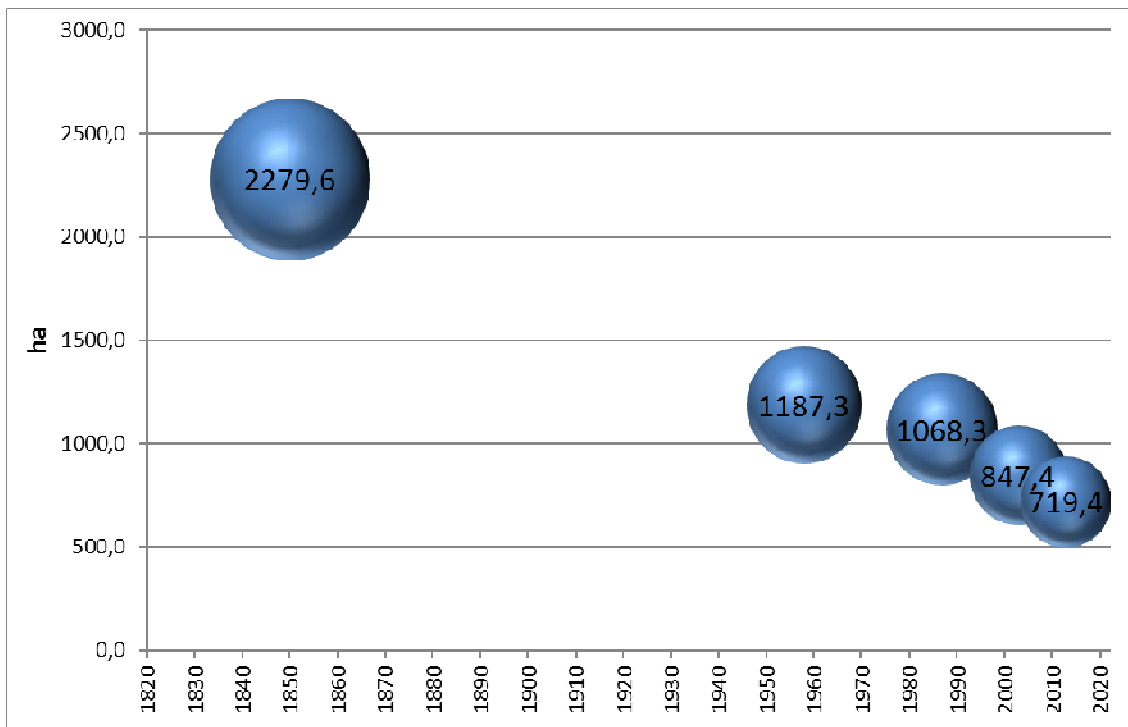


Fig. 4.7. Estensione superficiale in ettari nel massimo della PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013.

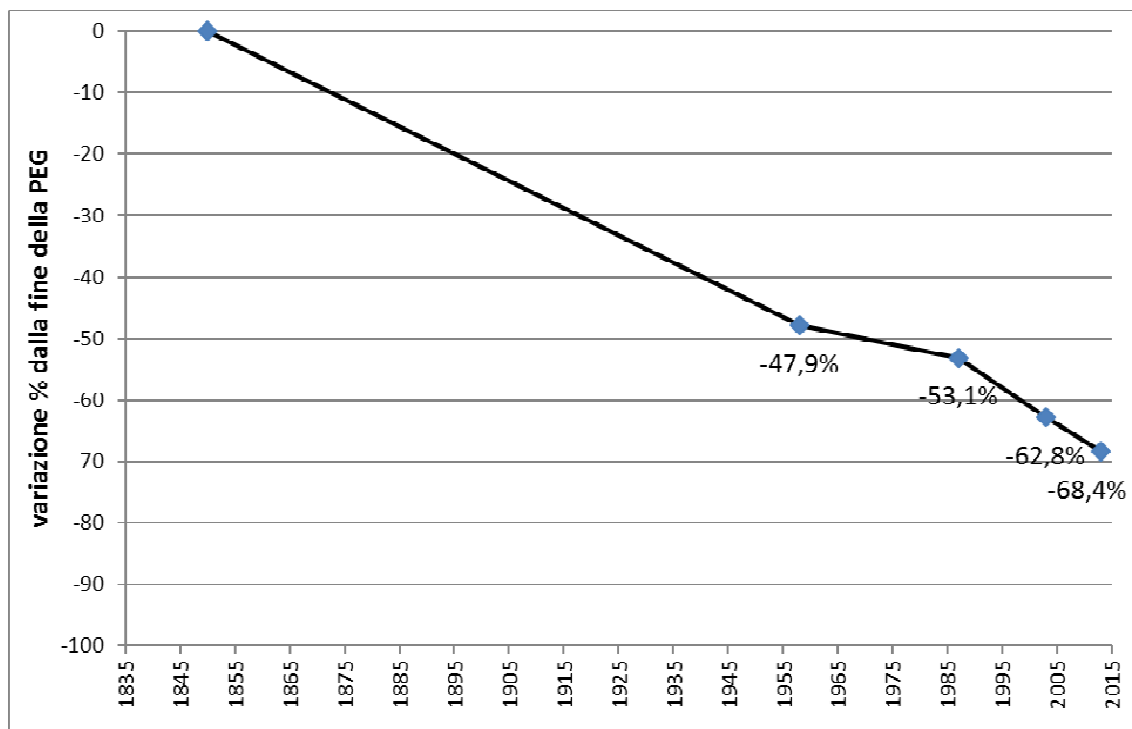
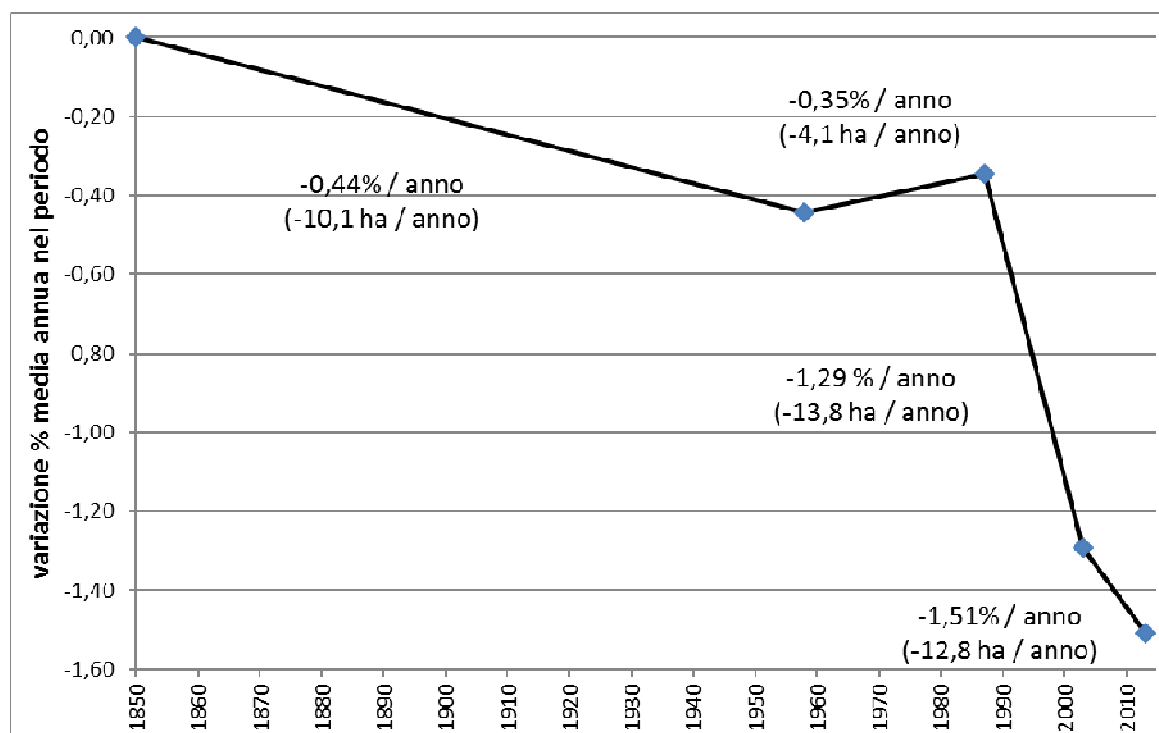


Fig. 4.8. Variazione percentuale della superficie glaciale rispetto all'estensione presente nel massimo della PEG.



year	Δy	S (ha)	ΔS (ha)	$\Delta \bar{S} y^{-1}$ (ha)	$\Delta S\%$ rispetto PEG	$\Delta S\%$ nel periodo	$\Delta \bar{S}\% y^{-1}$ nel periodo
1850		2279,6					
	108		-1092,3	-10,1		-47,9	-0,44
1958		1187,3			-47,9		
	29		-119,0	-4,1		-10,0	-0,35
1987		1068,3			-53,1		
	16		-220,9	-13,8		-20,7	-1,29
2003		847,4			-62,8		
	10		-127,9	-12,8		-15,1	-1,51
2013		719,4			-68,4		

Fig. 4.9. Variazione percentuale media annua e variazione media annua (ΔS) in ciascun periodo (PEG-1958, 1958-1987, 1987-2003 e 2003-2013) e tabella riepilogativa.

Dalla fine della PEG nel Gruppo della Presanella si è perso il 68,4% dell'area glaciale presente in quel momento, passando da 2279,6 ha a 719,4 ha nel 2013. In questo gruppo montuoso, e come nel Gruppo dell'Adamello, delle Dolomiti di Brenta e della Marmolada, non si è risentito in maniera evidente delle favorevoli condizioni climatiche (abbondanti nevicate ed estati fresche) del periodo 1970-1987 circa che negli altri gruppi montuosi hanno determinato una più o meno marcata avanzata glaciale. In questo contesto, considerando l'intero periodo 1958-1987, i ghiacciai hanno continuato a ridursi, seppur in maniera molto contenuta (-0,35%/anno; -4,1 ha/anno). Anche nel Gruppo della Presanella il periodo 1987-2003 è risultato essere il più deleterio per i ghiacciai, anche rispetto all'ultimo periodo 2003-2013, con arretramenti di 13,8 ha/anno (figg. 4.7-4.9).

Adamello

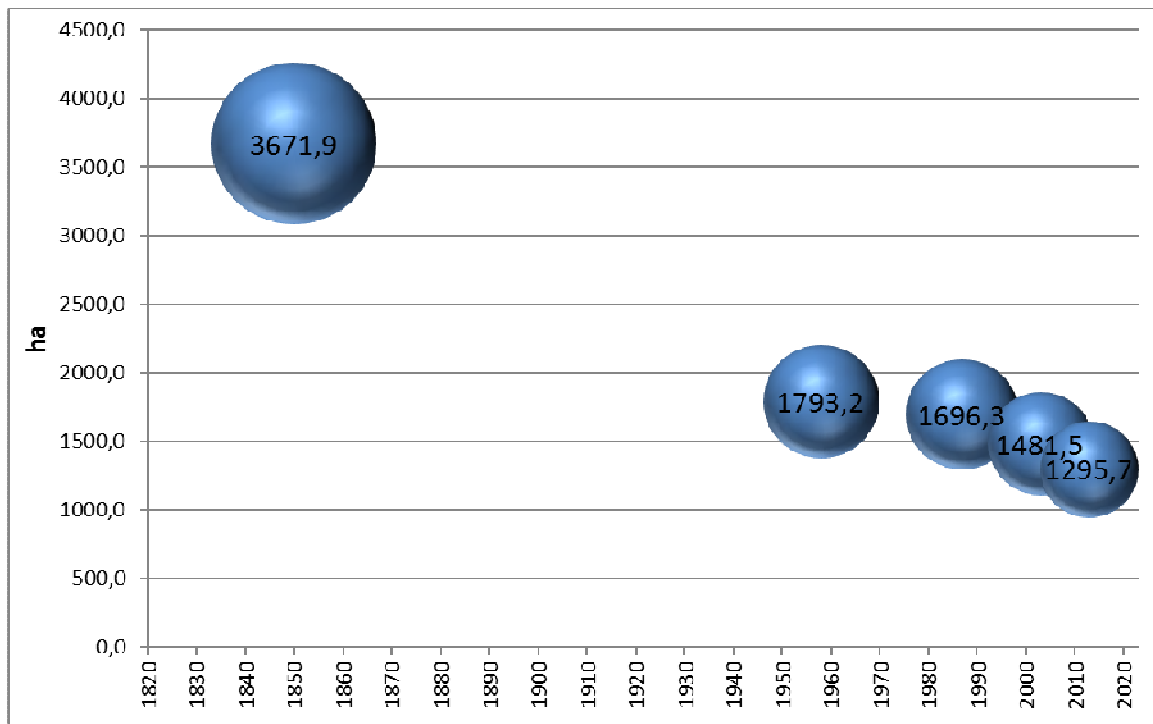


Fig. 4.10. Estensione superficiale in ettari nel massimo della PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013.

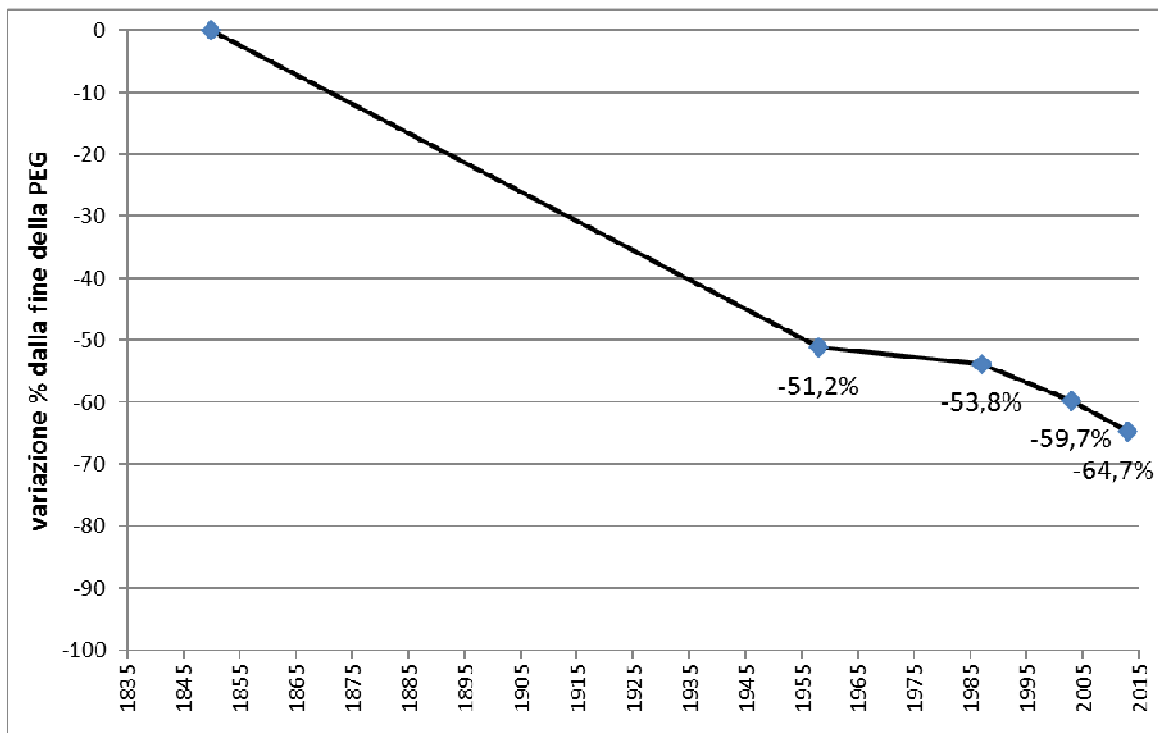
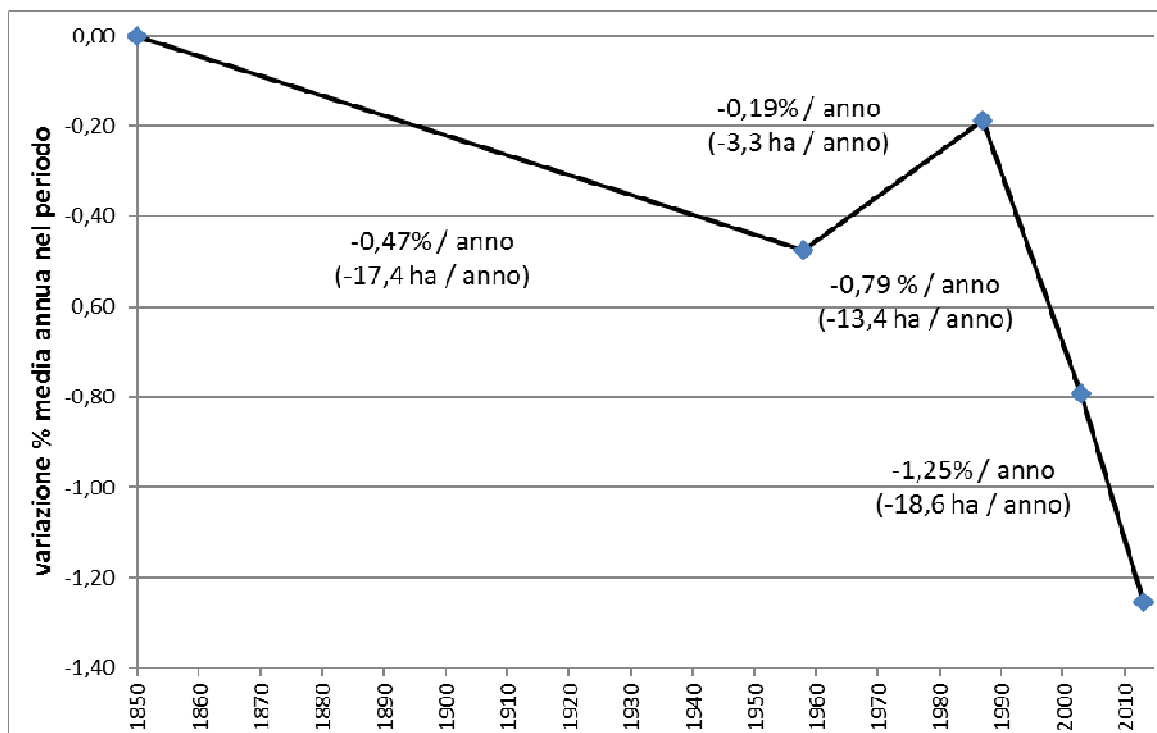


Fig. 4.11. Variazione percentuale della superficie glaciale rispetto all'estensione presente nel massimo della PEG.



year	Δy	S (ha)	ΔS (ha)	$\Delta \bar{S} y^{-1}$ (ha)	$\Delta S\%$ rispetto PEG	$\Delta S\%$ nel periodo	$\Delta \bar{S} \% y^{-1}$ nel periodo
1850		3671,9					
	108		-1878,7	-17,4		-51,2	-0,47
1958		1793,2			-51,2		
	29		-96,9	-3,3		-5,4	-0,19
1987		1696,3			-53,8		
	16		-214,7	-13,4		-12,7	-0,79
2003		1481,5			-59,7		
	10		-185,9	-18,6		-12,5	-1,25
2013		1295,7			-64,7		

Fig. 4.12. Variazione percentuale media annua e variazione media annua () in ciascun periodo (PEG-1958, 1958-1987, 1987-2003 e 2003-2013) e tabella riepilogativa.

Dalla fine della PEG nel Gruppo dell'Adamello si è perso il 64,7% dell'area glaciale presente in quel momento, passando da 3671,9 ha a 1295,7 nel 2013. Nonostante negli anni '70 e '80 i ghiacciai rispondessero alle favorevoli condizioni climatiche con delle avanzate, in Adamello si è registrato, considerando l'intero periodo 1958-1987, un arretramento medio pari a -0,19 %/anno, ovvero -3,3 ha/anno. A differenza di tutti gli altri gruppi montuosi, in Adamello il periodo 2003-2013 è stato quello durante il quale i ghiacciai sono arretrati maggiormente perdendo 18,6 ha/anno, ovvero 1,25% ogni anno (figg. 4.10-4.12).

Dolomiti di Brenta

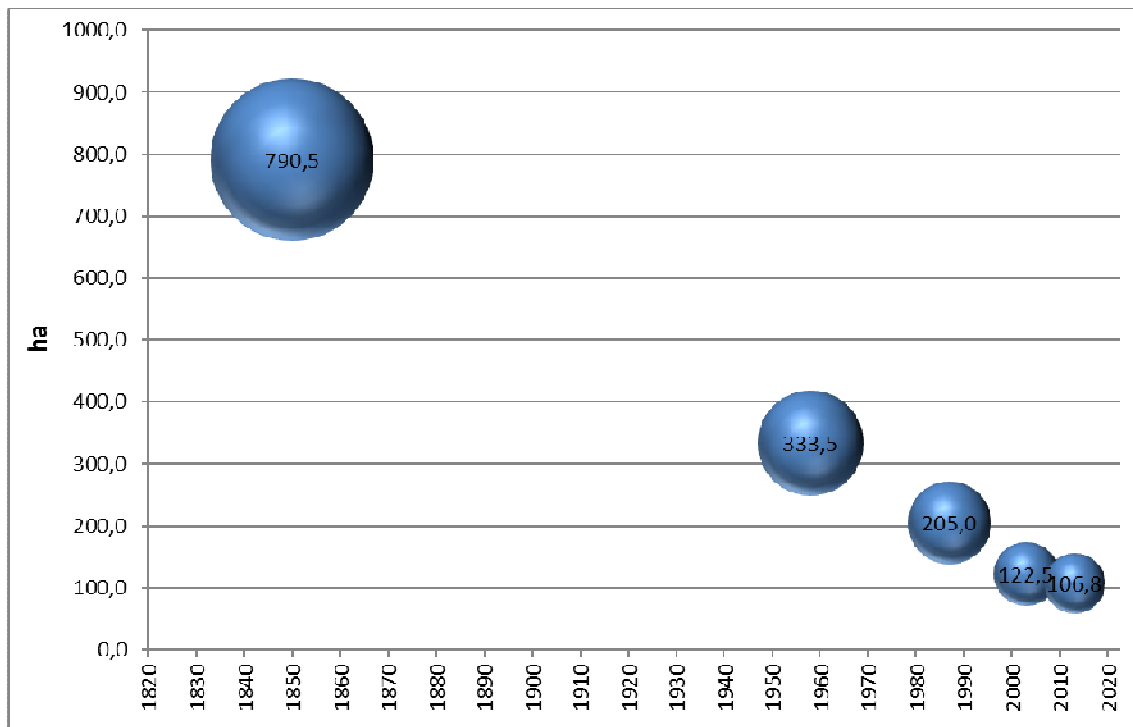


Fig. 4.13. Estensione superficiale in ettari nel massimo della PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013

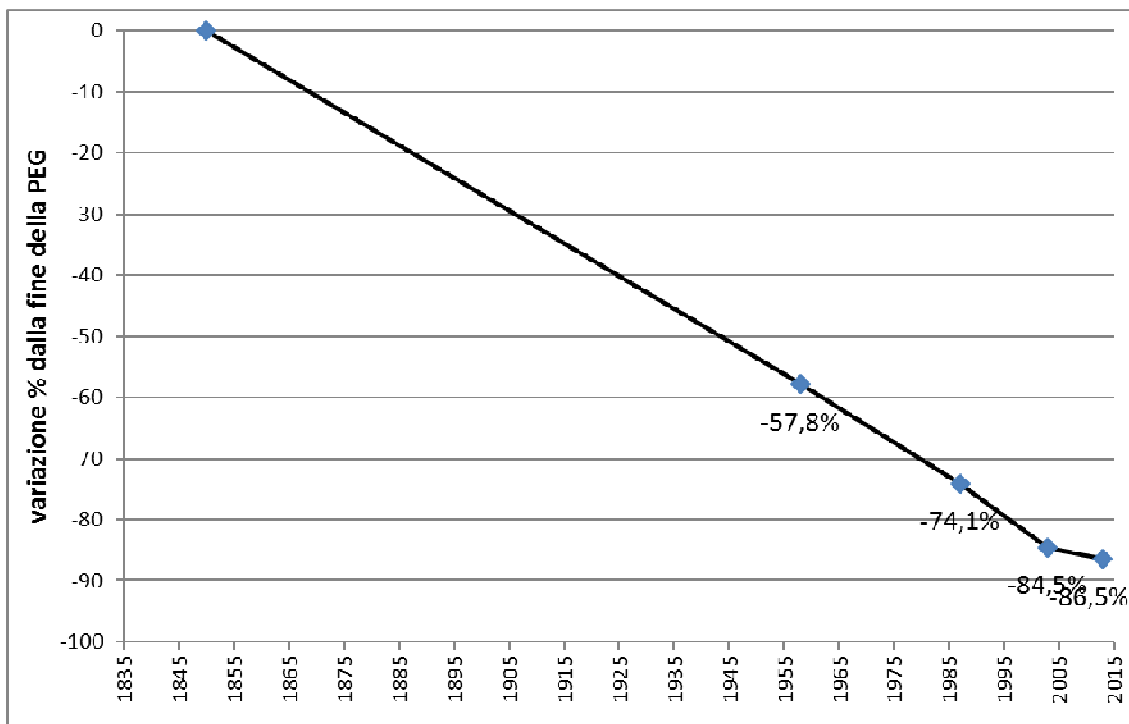
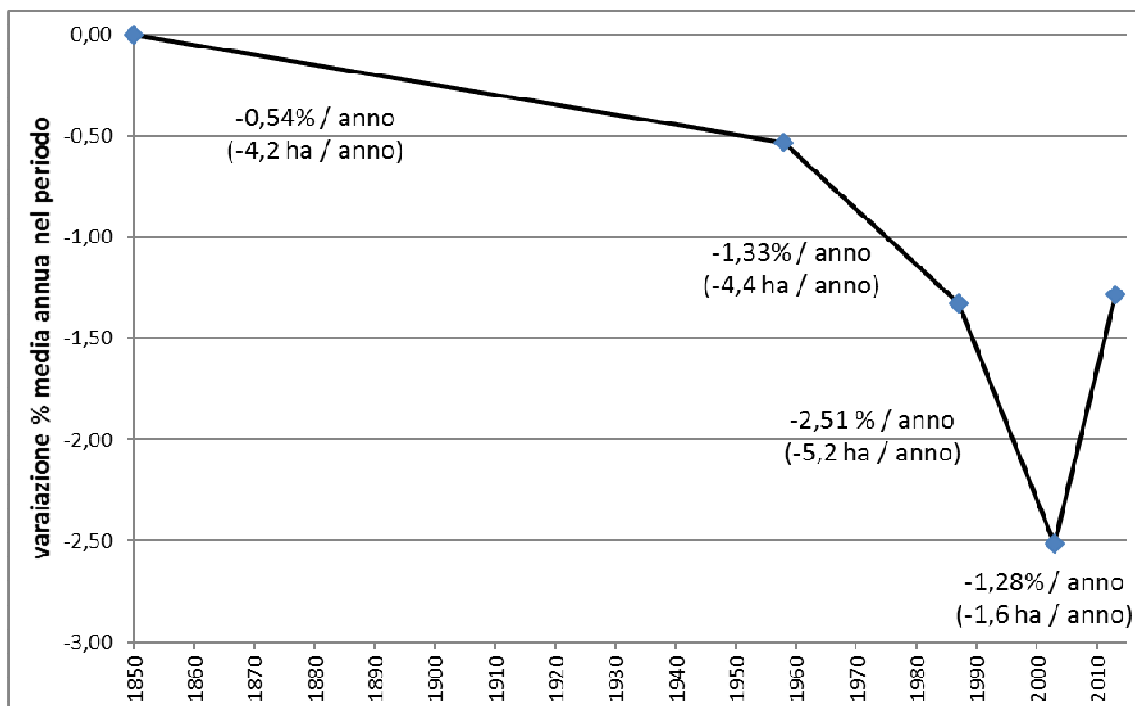


Fig. 4.14. Variazione percentuale della superficie glaciale rispetto all'estensione presente nel massimo della PEG.



year	Δy	S (ha)	ΔS (ha)	$\Delta \bar{S} y^{-1}$ (ha)	$\Delta S\%$ rispetto PEG	$\Delta S\%$ nel periodo	$\Delta \bar{S}\% y^{-1}$ nel periodo
1850		790,5					
	108		-457,0	-4,2		-57,8	-0,54
1958		333,5			-57,8		
	29		-128,5	-4,4		-38,5	-1,33
1987		205,0			-74,1		
	16		-82,5	-5,2		-40,2	-2,51
2003		122,5			-84,5		
	10		-15,7	-1,6		-12,8	-1,28
2013		106,8			-86,5		

Fig. 4.15. Variazione percentuale media annua e variazione media annua () in ciascun periodo (PEG-1958, 1958-1987, 1987-2003 e 2003-2013) e tabella riepilogativa.

Dalla fine della PEG nelle Dolomiti di Brenta si è perso l'86,5% dell'area glaciale presente in quel momento, passando da 790,5 ha a 106,8 ha nel 2013. Una così forte riduzione si è avuta anche in tutti gli altri gruppi dolomitici della Provincia (Marmolada e Pale di San Martino). Anche nel periodo 1958-1987, il più favorevole da un punto di vista climatico, si registra un forte tasso di arretramento medio (-1,33%/anno; -4,4 ha/anno). L'ultimo periodo, il 2003-2013, è risultato essere, dopo il periodo 1850-1958, quello meno impattante per i ghiacciai, con riduzioni di 1,6 ha/anno pari a 1,28%/anno (figg. 4.13-4.15).

Marmolada

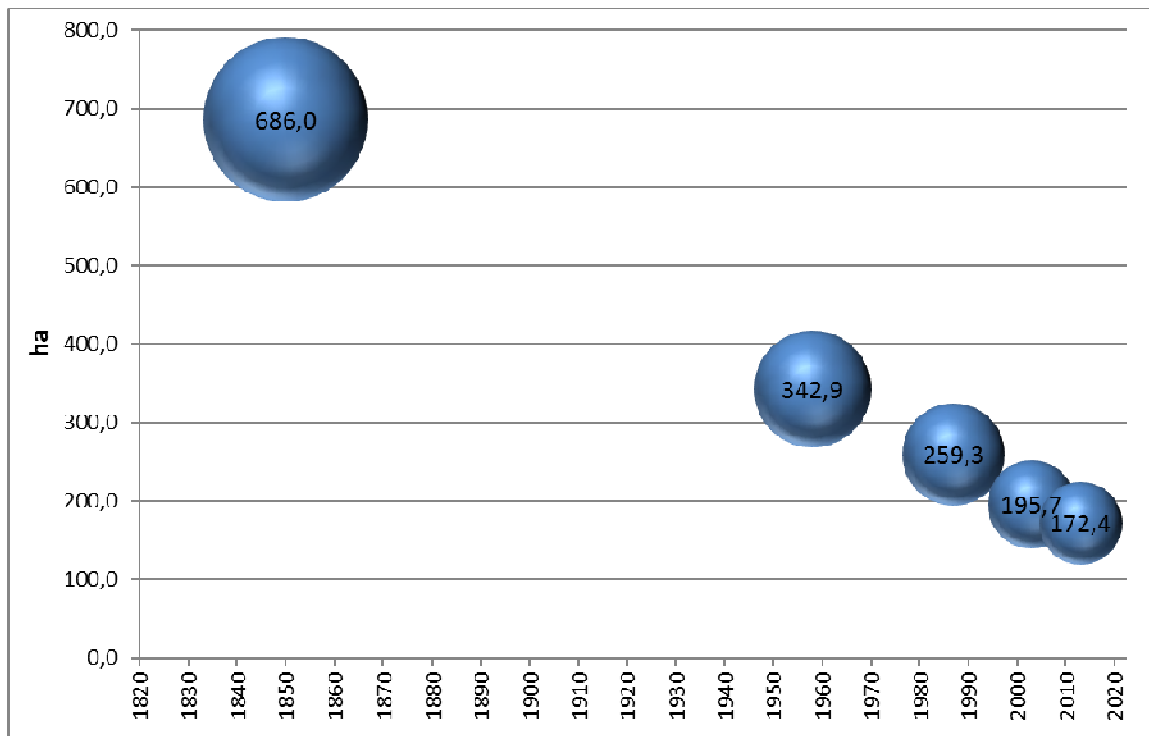


Fig. 4.16. Estensione superficiale in ettari nel massimo della PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013.

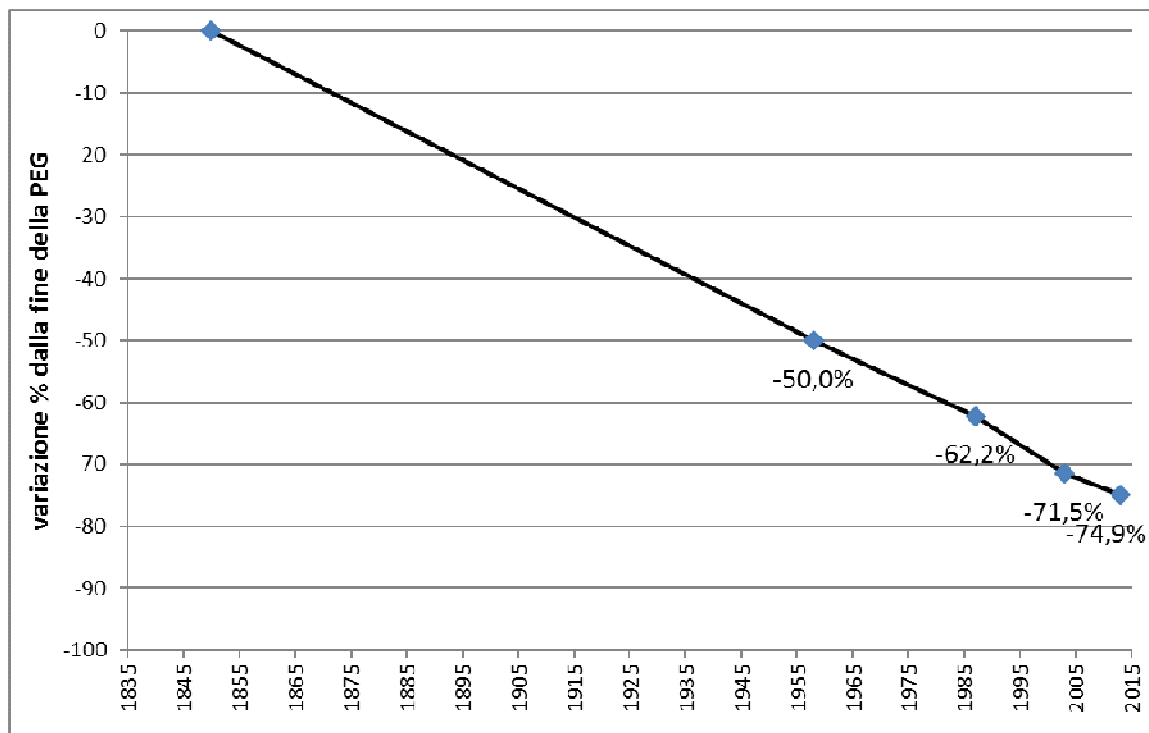
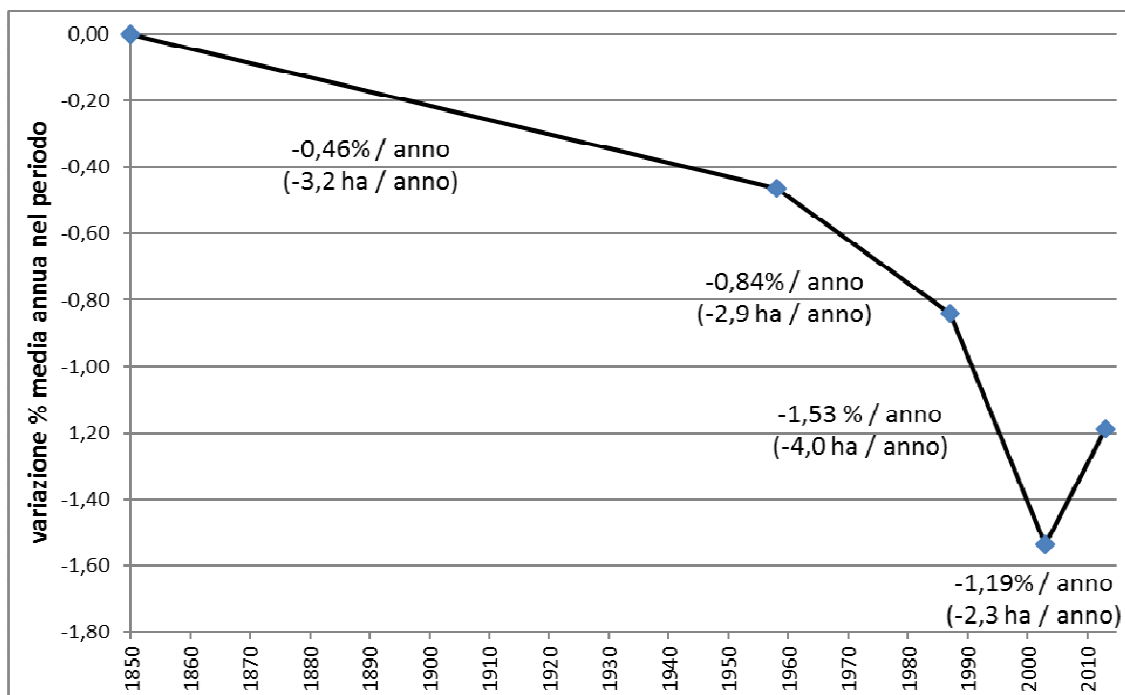


Fig. 4.17. Variazione percentuale della superficie glaciale rispetto all'estensione presente nel massimo della PEG.



year	Δy	S (ha)	ΔS (ha)	$\Delta \bar{S} y^{-1}$ (ha)	$\Delta S\%$ rispetto PEG	$\Delta S\%$ nel periodo	$\Delta \bar{S}\% y^{-1}$ nel periodo
1850		686,0					
	108		-343,1	-3,2		-50,0	-0,46
1958		342,9			-50,0		
	29		-83,6	-2,9		-24,4	-0,84
1987		259,3			-62,2		
	16		-63,7	-4,0		-24,5	-1,53
2003		195,7			-71,5		
	10		-23,3	-2,3		-11,9	-1,19
2013		172,4			-74,9		

Fig. 4.18. Variazione percentuale media annua e variazione media annua () in ciascun periodo (PEG-1958, 1958-1987, 1987-2003 e 2003-2013) e tabella riepilogativa.

Alla fine della PEG nel Gruppo della Marmolada si è perso il 74,9% dell'area glaciale presente in quel momento, passando da 686 ha a 172,4 ha nel 2013. Anche in Marmolada, considerando l'intero periodo 1958-1987, si è registrato un contenuto arretramento medio pari a -0,84 %/anno ovvero -2,9 ha/anno. Il periodo 1987-2003 ha fatto registrare gli arretramenti maggiori (-1,53 %/anno; -4,0 ha/anno). L'ultimo periodo 2003-2013 è stato invece più favorevole, seppur con ghiacciai in continua contrazione (-1,19 %/anno; -2,3 ha/anno), (figg. 4.16-4.18).

Pale di San Martino

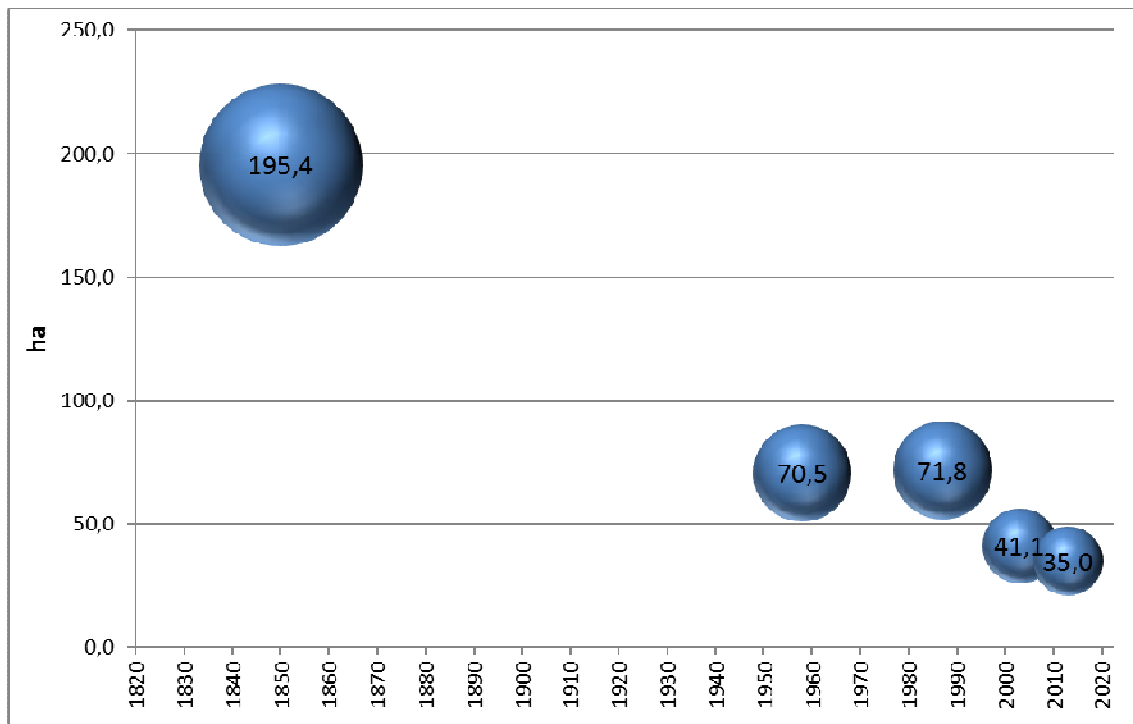


Fig. 4.19. Estensione superficiale in ettari nel massimo della PEG, 1958, 1987, 2003 e 2013.

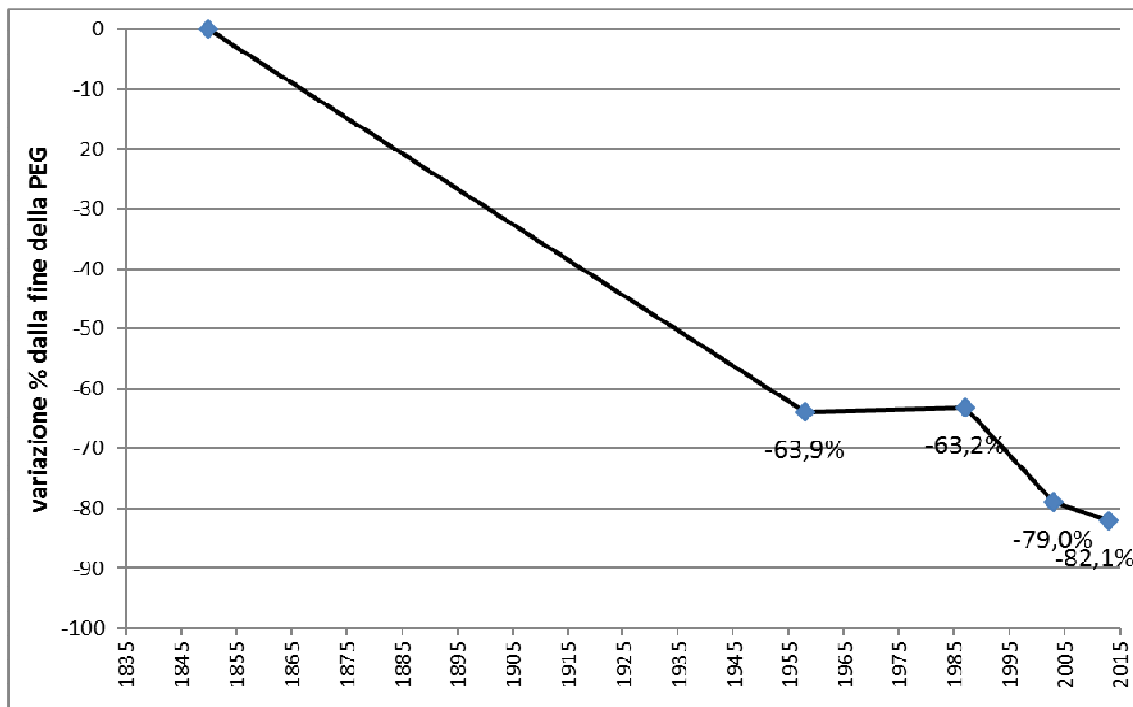
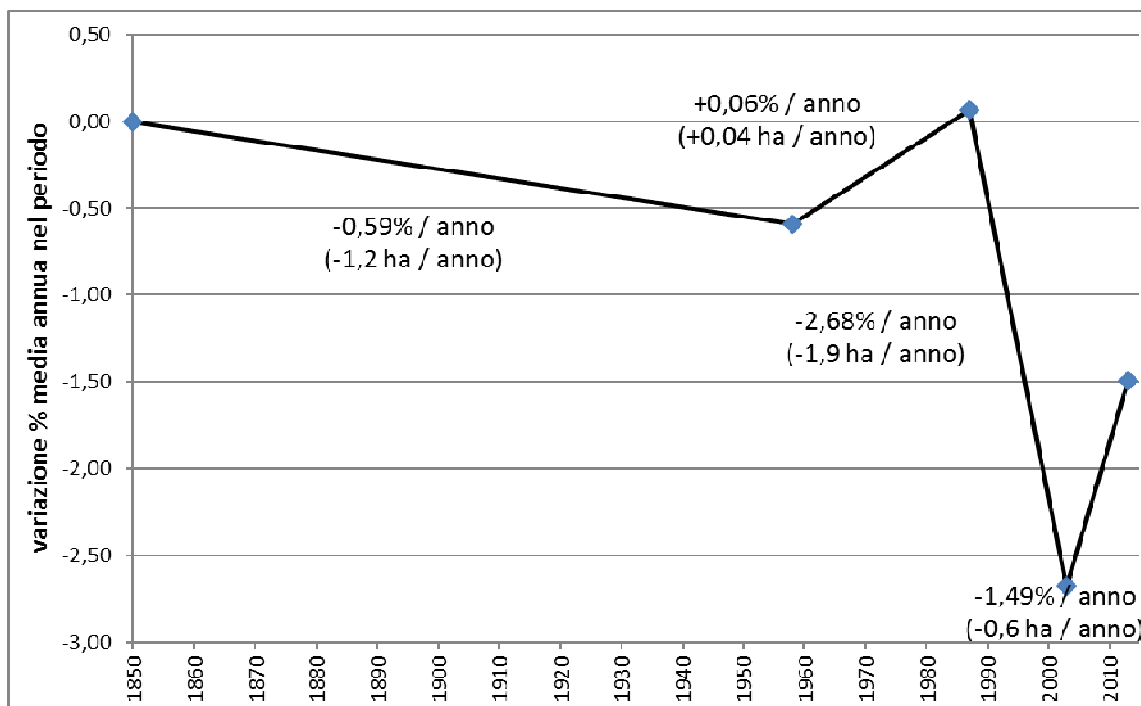


Fig. 4.20. Variazione percentuale della superficie glaciale rispetto all'estensione presente nel massimo della PEG.



year	Δy	S (ha)	ΔS (ha)	ΔS̄ y ⁻¹ (ha)	ΔS% rispetto PEG	ΔS% nel periodo	ΔS̄% y nel periodo
1850		195,4					
	108		-124,8	-1,16	-63,9	-63,9	-0,59
1958		70,5			-63,9		
	29		1,3	0,04	-63,2	1,8	0,06
1987		71,8			-63,2		
	16		-30,8	-1,92	-79,0	-42,8	-2,68
2003		41,1			-79,0		
	10		-6,1	-0,61	-82,1	-14,9	-1,49
2013		35,0			-82,1		

Fig. 4.21. Variazione percentuale media annua e variazione media annua () in ciascun periodo (PEG-1958, 1958-1987, 1987-2003 e 2003-2013) e tabella riepilogativa.

Dalla fine della PEG nel Gruppo delle Pale di San Martino si è perso l'82,1% dell'area glaciale presente in quel momento, passando da 195,4 ha a 35 ha nel 2013. La fase positiva degli anni '70-'80 ha fatto sì che la superficie glaciale nel 1987 fosse maggiore di quella presente nel 1958, fatto avvenuto anche nel Gruppo del Cevedale. Considerando l'intero periodo 1958-1987, i ghiacciai sono avanzati mediamente dello 0,06 %/annuo, pari a 0,04 ha/anno. Il successivo periodo 1987-2003 è stato fra tutti, come per gli altri gruppi dolomitici delle Dolomiti di Brenta e della Marmolada, quello durante il quale i ghiacciai hanno sofferto di più con arretramenti medi di 1,92 ha/anno, ovvero -2,68 %/anno (figg. 4.19-4.21).

4.2. Quote dei fronti glaciali

In ambiente GIS, attraverso la sovrapposizione dei poligoni dei ghiacciai con il modello digitale del terreno (DEM) alla risoluzione di 2 m (il valore della quota viene assegnato nel punto centrale di un quadrato di terreno di 2 m per 2 m), per ogni poligono (record) è stata calcolata la quota minima (attributo Quota_min) ovvero la quota più bassa raggiunta dal ghiacciaio nei vari periodi (PEG, 1958, 1987, 2003, 2013). Si è scelto di ragionare sulla quota minima in quanto la posizione del fronte glaciale è di più facile determinazione rispetto alla quota massima, ed offre quindi un dato più attendibile. Nella PEG, infatti, la quota minima è segnata dalle morene frontali o dal deposito glaciale ad essa relativo. La quota minima nel 1958 è stata ricavata dalla rispettiva cartografia, in seguito digitalizzata, sulla quale il limite inferiore dei ghiacciai è riportato più fedelmente rispetto al limite superiore, più difficilmente raggiungibile o visibile e quindi quasi impossibile da cartografare. Nel 1987, 2003 e 2013, invece, i limiti inferiori dei ghiacciai sono stati ottenuti attraverso la più facile interpretazione delle ortofoto o delle foto aeree scattate in quei periodi dalla PAT.

La determinazione del limite superiore del ghiacciaio, soprattutto nella PEG, risulta infatti più difficile e quindi il calcolo della quota massima e di quella media poteva essere più facilmente soggetta ad errori. Il limite superiore dei ghiacciai nella PEG può essere determinato attraverso il rilevamento sul terreno di forme di erosione quali creste arrotondate, oppure attraverso l'analisi della copertura lichenica che, nei terreni in precedenza occupati dal ghiacciaio, è più scarsa rispetto a quelli non coperti dal ghiacciaio durante la PEG.

E' inoltre preferibile analizzare la quota minima perché ad una marcata ed apprezzabile variazione del ghiacciaio nella porzione frontale corrisponde una ben più contenuta e difficilmente quantificabile variazione del ghiacciaio nelle porzioni a monte.

La descrizione del comportamento dei ghiacciai dalla PEG ad oggi è quindi possibile e di più immediata comprensione analizzando statisticamente il parametro "quota minima", la quota inferiore toccata dal ghiacciaio nella PEG, nel 1958, nel 1987, nel 2003 e nel 2013.

4.2.1. Inquadramento generale

Considerando l'intero territorio provinciale, la fronte dei ghiacciai nel massimo della Piccola Età Glaciale era posto mediamente a 2.540 metri di quota. Dal 1850, fine della PEG, ad oggi, il fronte glaciale si è sempre innalzato di quota con diverse velocità nei vari periodi (fig. 4.23):

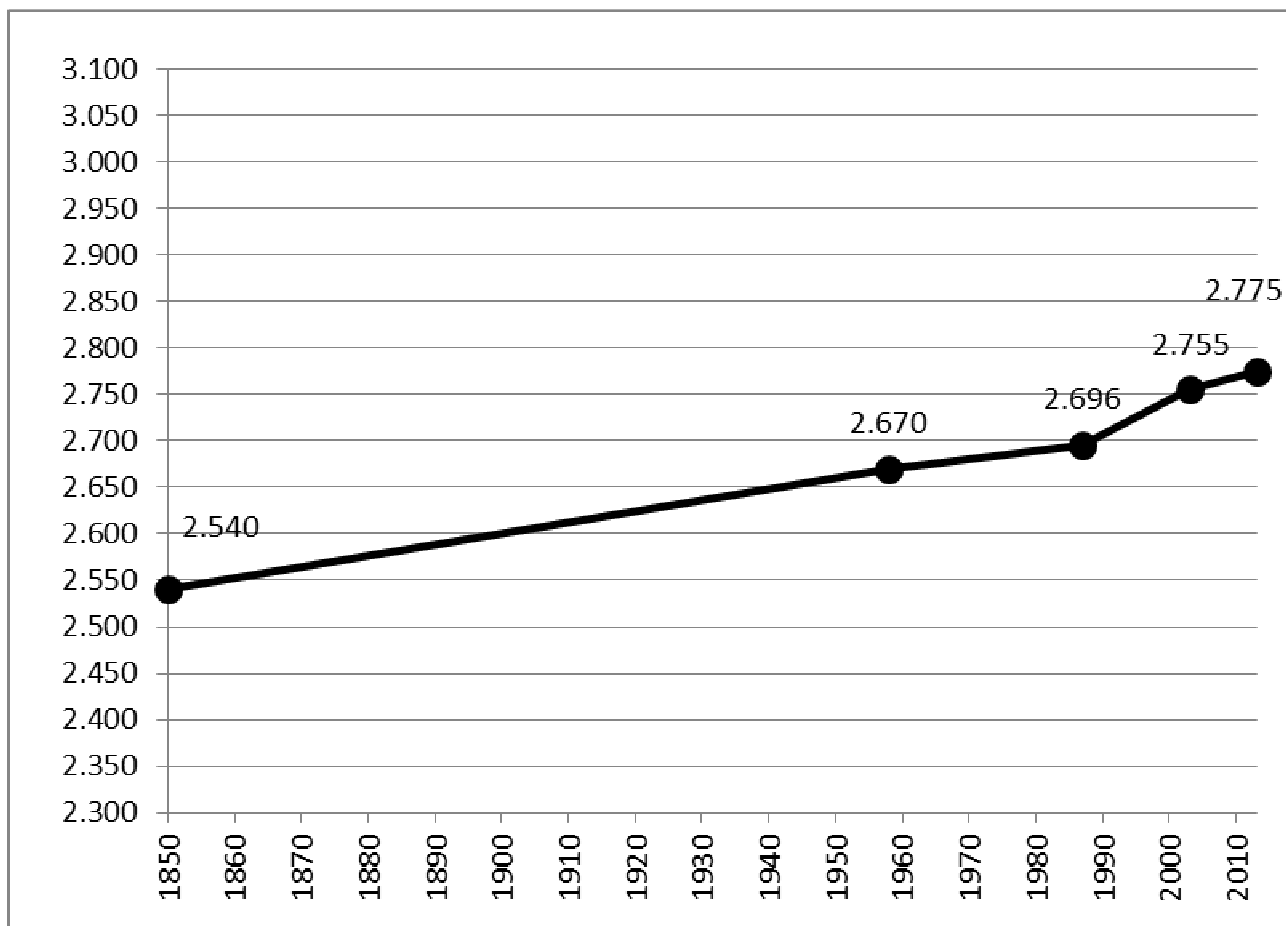


Figura 4.23. Quota del fronte glaciale medio determinato attraverso la media della quota frontale di tutti i ghiacciai nei diversi periodi.

	1850-1958	1958-1987	1987-2003	2003-2013
variazione fronte (m/anno)	-1,2	-0,9	-3,7	-2,0

Figura 4.24. Variazione del fronte medio nei diversi periodi.

I valori sottolineano come, nel periodo 1958-1987, vi sia stato il rialzo più contenuto dell'intero periodo considerato (0,9 m all'anno), periodo infatti caratterizzato anche da importanti avanzate glaciali. Il periodo caldo degli anni Novanta, invece, ha fortemente contribuito all'arretramento delle masse glaciali (ogni anno il fronte glaciale saliva mediamente

di 3,7 m di quota), ritiro molto più importante anche di quanto avvenuto nel successivo inizio di terzo millennio (2003-2013, innalzamento di 2 m all'anno) (fig. 4.24).

4.2.2 Analisi statistica nei diversi gruppi montuosi del Trentino

Vediamo ora il dettaglio della posizione media della fronte nei diversi gruppi montuosi glacializzati del Trentino (fig. 4.25):

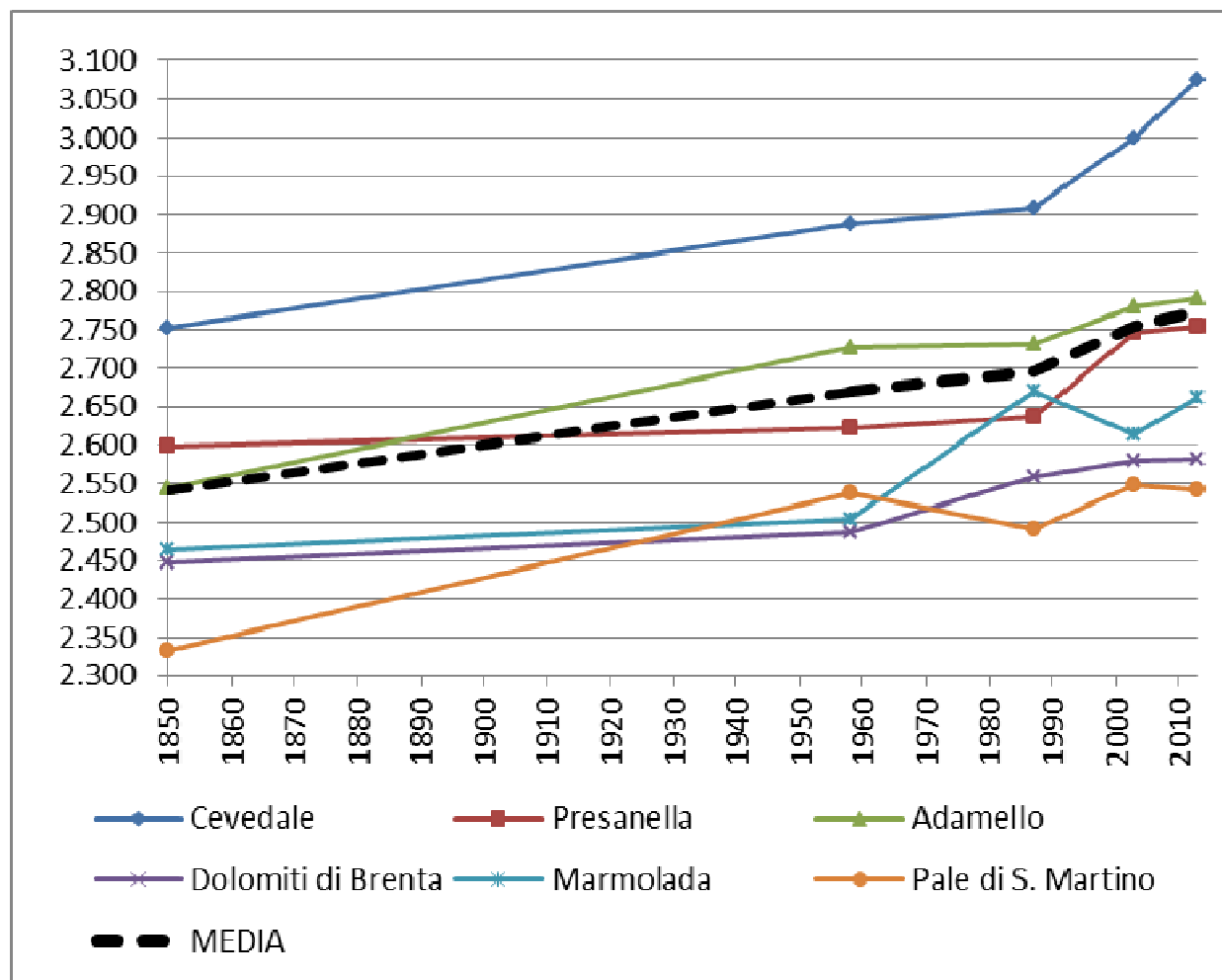


Figura 4.25. Quota media del fronte glaciale nei diversi gruppi montuosi

Il gruppo montuoso che dalla PEG ad oggi ha avuto e continua ad avere i ghiacciai a più alta quota è quello del Cevedale. I gruppi carbonatici e dolomitici (Marmolada, Pale di San Martino, Dolomiti di Brenta) invece, sono quelli che ospitano i ghiacciai a più bassa quota. Ciò può essere spiegato con la presenza, in questi ultimi, di ghiacciai di canalone (Ghiacciaio del Crozzon, ad esempio) e di circo, meno colpiti dall'irraggiamento solare estivo e avvantaggiati da un accumulo nevoso di tipo valanghivo proveniente dai ripidi versanti che delimitano il canalone o il circo glaciale. Al contrario, molti ghiacciai del Gruppo del Cevedale sono morfologicamente più aperti ed esposti ai quadranti meridionali e pertanto maggiormente

colpiti dall'irraggiamento solare estivo che accelera la fusione; in più, possono godere unicamente di apporti nevosi diretti.

In quasi tutti i gruppi montuosi si ritrova il comportamento descritto in precedenza per l'intero Trentino (linea nera tratteggiata): nel periodo 1958-1987 (ad eccezione della Marmolada e delle Dolomiti di Brenta) vi è quasi una inversione di tendenza con ghiacciai stazionari o addirittura in avanzata e quindi con una forte diminuzione del tasso di innalzamento della quota della fronte. La fronte, invece, si è alzata fortemente di quota nel periodo 1987-2003 (ancora ad eccezione della Marmolada), sottolineando come questo periodo abbia fatto registrare temperature estive alte e inverni poco nevosi.

Si deve tener presente come la morfologia del terreno può influenzare fortemente il valore della quota della fronte: anche in presenza di forti arretramenti frontali, per ghiacciai che insistono su terreni pianeggianti la quota del fronte si innalza di poco. Al contrario, anche con una piccola variazione ma in presenza di terreni ripidi si hanno forti innalzamenti di quota. Questo comportamento può quindi spiegare l'andamento della quota della fronte nel gruppo della Marmolada che sembra quasi in contraddizione con i ghiacciai del resto della Provincia nei periodi 1958-1987 e 1987-2003 (in azzurro nel grafico). Il gruppo montuoso dell'Adamello (linea verde) è quello che dalla PEG ad oggi si è comportato in maniera più rappresentativa, ovvero più vicino alla media. È il gruppo che infatti ha ghiacciai a tutte le esposizioni, con caratteristiche morfologiche diverse (ghiacciai di circo, di pendio e di tipo scandinavo) e con ghiacciai che possono godere di apporti nevosi sia diretti che da valanga.

4.2.3. Variazioni frontali e clima

La figura 4.26 mostra le variazioni frontali medie dei ghiacciai trentini dal 1920 a oggi. Il grafico evidenzia come i ghiacciai, in questo periodo, abbiano vissuto una fase di costante arretramento, interrotta negli anni '70-'80

A sua volta, la variazione della posizione del fronte glaciale è una risposta alle variazioni climatiche, risposta che avviene con un ritardo temporale che dipende dall'esposizione, dalla dimensione, dalla massa e dalla posizione topografica del ghiacciaio. Ad esempio, piccoli ghiacciai, possono presentare delle risposte estremamente rapide ai cambiamenti climatici, risposte che sono più lente, invece, per grandi ghiacciai.

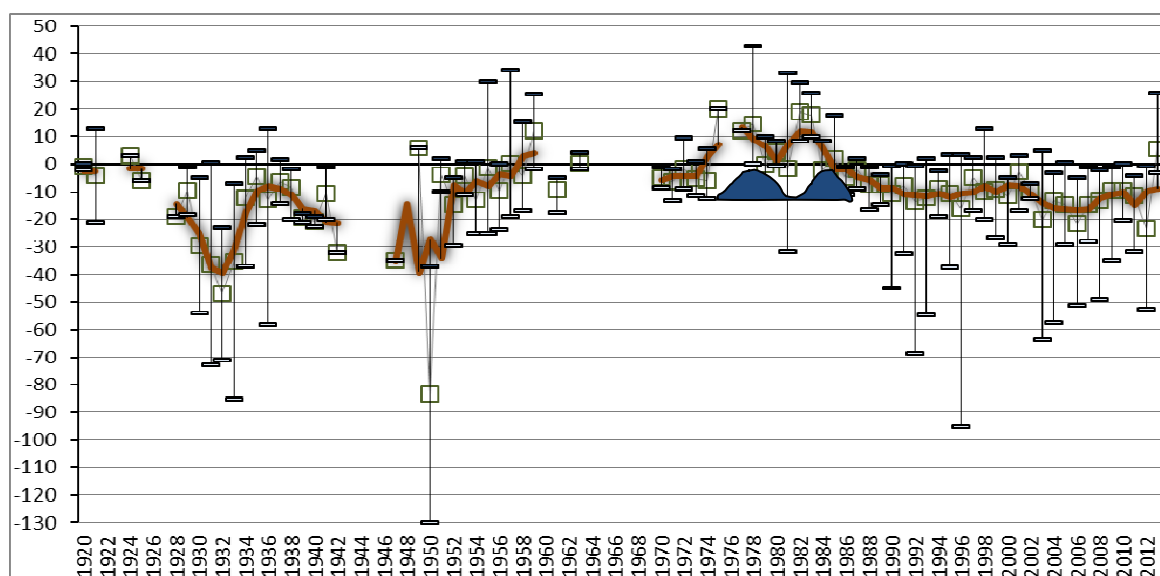


Fig. 4.26. Variazione frontale media dei ghiacciai del Trentino. In blu il periodo '70-'80 che ha visto i ghiacciai avanzare.

I parametri climatici ai quali il ghiacciaio risponde sono le precipitazioni nevose invernali e le temperature estive. Studi precedenti (Casarotto & Rizzi, 2015) mettono in evidenza come le variazioni glaciali siano meglio correlate alle precipitazioni invernali del periodo novembre – febbraio e soprattutto alle temperature massime estive del periodo maggio – ottobre, e come i ghiacciai rispondano ad esse variando la loro forma con un ritardo medio di 3 anni. Ciò significa che per confrontare in uno stesso grafico temperature e/o precipitazioni e variazioni frontali dei ghiacciai, queste ultime devono essere anticipate di 3 anni, poiché i ghiacciai rispondono alle variazioni climatiche con un ritardo medio di 3 anni.

A partire dal 1980, le temperature massime del periodo maggio – ottobre registrate dalle stazioni meteo della Provincia Autonoma di Trento, che coprono in maniera capillare il territorio in termini spaziali e altitudinali, sono sempre rimaste al di sopra della media del periodo 1961-1990 (che il WMO, World Meteorological Organization, ha definito come periodo di riferimento per la climatologia). Altri periodi caldi sono stati il 1941-1949 e il 1924-1932. Durante questi periodi i fronti glaciali arretrano (valori negativi nel grafico) e la quota minima del fronte glaciale sale (fig. 4.27).

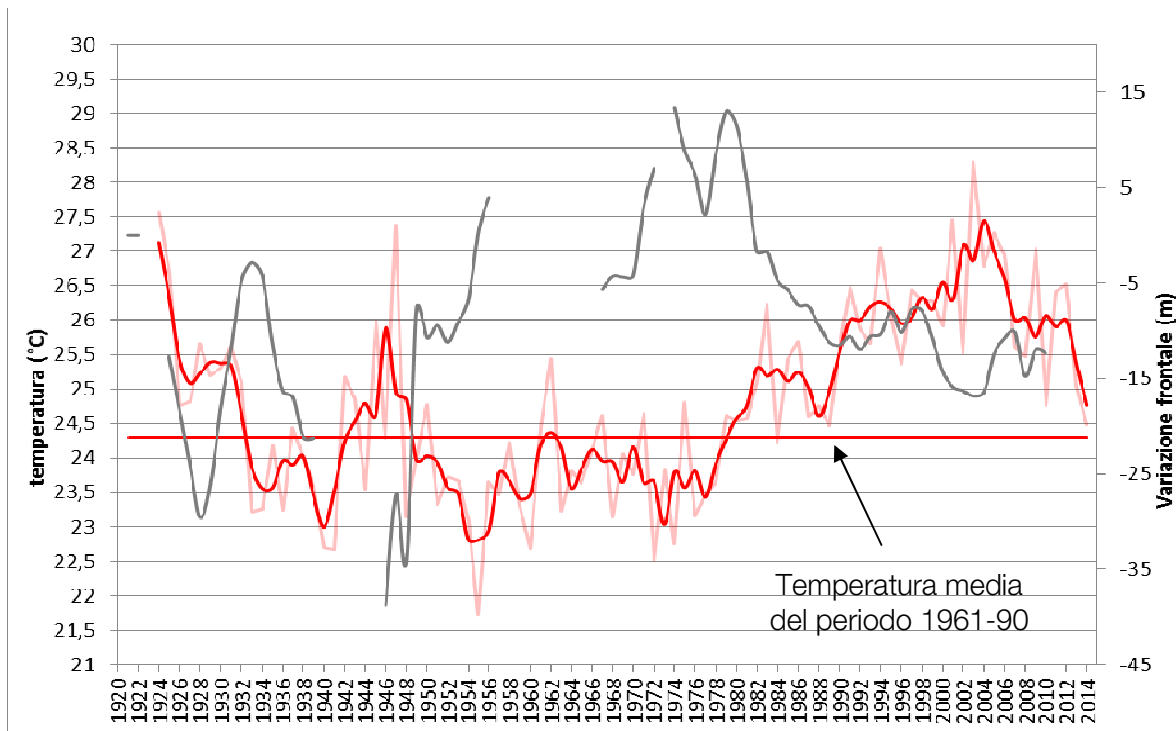


Fig. 4.27. Temperature massime del periodo maggio – ottobre, in rosso, e variazioni frontali anticipate di 3 anni, in grigio.

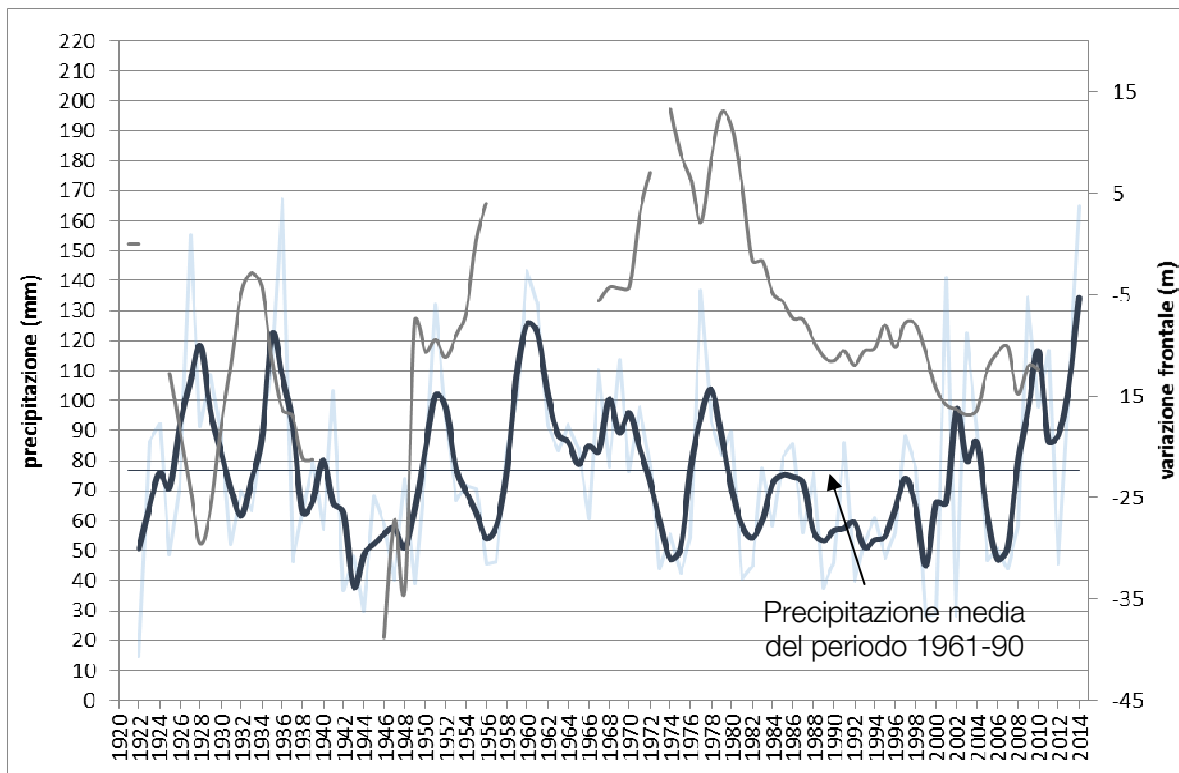


Fig. 4.28. Precipitazioni del periodo novembre – febbraio, in blu, e variazioni frontali anticipate di 3 anni, in grigio.

Le precipitazioni invernali sono meno correlate con le variazioni frontali dei ghiacciai rispetto alle temperature estive. Nonostante ciò dal grafico appare comunque evidente come i picchi di precipitazioni abbondanti degli anni '60, '70 e '80 abbiano contribuito all'aumento degli areali glaciali. A partire dagli anni '80 le precipitazioni si fanno più scarse, sotto la media del periodo di riferimento per la climatologia (1961-1990). Questo fatto e il contemporaneo aumento delle temperature hanno fortemente contribuito all'arretramento glaciale e quindi all'innalzamento del fronte che infatti nei periodi considerati 1987-2003 (ad eccezione della Marmolada) e 2003-2013 (ad eccezione delle Pale di San Martino) appare in forte risalita in tutti i gruppi montuosi.

Durante l'ultimo periodo 2003-2013 la velocità con la quale il fronte glaciale è risalito appare diminuita. Ciò va in accordo con la diminuzione delle temperature massime (a partire dal 2004, ma comunque sempre al di sopra della media del periodo 1961-90) e con l'aumento delle precipitazioni invernali (a partire dal 2008).

4.3. Diagramma ad albero

Per tracciare l'evoluzione dei ghiacciai si è anche provveduto alla costruzione di un "diagramma ad albero" (in allegato diagramma ad albero.pdf). Tale elencazione grafica, che presenta i ghiacciai in forma gerarchica, permette di cogliere l'evoluzione di ogni ghiacciaio con le possibili estinzioni, frammentazioni o accrescimenti subiti. Per ogni ghiacciaio viene riportato il codice ed il nome con cui esso viene codificato in ciascun catasto. Nell'Elenco dei ghiacciai italiani del 1925 il codice è definito da partizione, sezione, gruppo e numero; nel Catasto 1958 sono riportati il nome principale e quello secondario.

Per quanto riguarda il codice attribuito al ghiacciaio nella PEG, esso fa riferimento al primo codice con cui il ghiacciaio viene identificato a partire dal catasto 1958 o successivi. Diversamente, nel caso in cui l'area glacializzata nella PEG non risulti inserita in nessun catasto, perché il ghiacciaio si è estinto ancor prima del 1927, le si è attribuito il codice 9999. L'ordinamento verticale dei ghiacciai segue l'ordine con cui essi sono stati descritti per la prima volta ovvero nell'Elenco dei Ghiacciai Italiani 1925.

Le difficoltà maggiori nella costruzione del diagramma si sono verificate nel trovare la giusta corrispondenza tra i ghiacciai riportati nell'Elenco dei ghiacciai italiani del 1925, non dotato di cartografia, e quelli del Catasto 1958. Lo stesso diagramma ha messo poi in evidenza il problema della diversa concezione di ghiacciaio tra chi ha redatto i diversi catasti. In passato, ghiacciai piccoli ma con superficie comunque superiore all'ettaro (e quindi oggi considerati ghiacciai), non venivano cartografati; ecco perché alcuni ghiacciai "possono scomparire e ricomparire" in catasti successivi oppure comparire solamente nei catasti recenti.

Oggi (e a partire dal Catasto 2003) viene considerato ghiacciaio un corpo con una superficie maggiore di 1 ettaro. Con il termine "*No name*" sono indicati nel diagramma i ghiacciai minori 2003 ai quali non è stato assegnato nome e codice. Da notare che alcuni codici si ripetono: questo vale in particolare per il ghiacciaio della Lobbia (cod. 637.0) che dal 2003 ha compreso il 615, per il ghiacciaio 677-678 PEG che identifica sia la Vedretta Cercen sia il gruppo Vedretta del Passo d'Amola e Vedretta della Presanella del 1925; inoltre, se la cartografia riferita ad un medesimo ghiacciaio presentava più poligoni, perché il ghiacciaio risultava frazionato in diverse parti, ad ognuno di essi è stato attribuito il medesimo codice e nome. Anche il nome non è sempre univoco per ogni corpo glaciale.

Queste problematiche mettono in evidenza come sia ora necessario un intervento di revisione e controllo della nomenclatura, utile a mantenere chiarezza sull'evoluzione che ogni apparato glaciale ha subito e per facilitare le prossime operazioni di nomenclatura che saranno sempre più frequenti visti i numerosi frazionamenti ai quali i ghiacciai stanno andando oggi incontro a seguito del loro arretramento.

5. CONCLUSIONI

L'estensione dei ghiacciai durante la PEG è stata ricostruita attraverso il rilevamento delle morene e dei depositi glaciali messi in posto durante questo periodo, come anche attraverso l'individuazione dei rock glaciers attivi in quanto considerati possibile evoluzione di ghiacciai afferenti a tale periodo ed ora coperti da detrito. Questa indagine geomorfologica è stata condotta attraverso rilevamento diretto sul terreno, studi cartografici, indagine di fotografie aeree e storiche, immagini ortofoto e rilievi Lidar. I limiti morfologici sono stati impostati in ambiente GIS come feature lineare, indicando per ogni record la tipologia di forma o di deposito glaciale e il grado di incertezza. L'interpretazione di queste linee ha poi portato alla digitalizzazione di feature poligonali rappresentanti l'estensione dei ghiacciai nel massimo della PEG, anche in questo caso riportando il grado di incertezza. Si sono infatti dovute affrontare alcune problematiche relative soprattutto alla definizione del limite superiore del ghiacciaio in corrispondenza del bacino di accumulo, ove le morfologie non sono particolarmente evidenti. Tutte queste digitalizzazioni sono state eseguite alla scala 1:2.000 e inserite all'interno di un geodatabase.

Sono stati quindi digitalizzati i poligoni dei ghiacciai riportati sulle cartografie del Catasto dei Ghiacciai Italiani 1959 - 1962 (Comitato Glaciologico Italiano e Consiglio Nazionale delle Ricerche), Volume III – Ghiacciai della Lombardia e dell'Ortles-Cevedale (1961) e Volume IV – Ghiacciai delle Tre Venezie e dell'Appennino (1962). Per quanto riguarda la cartografia di questo catasto, si vuole sottolineare come sia stato a volte difficile validarne i limiti, in quanto tracciati in maniera approssimativa, a piccola scala, o in contraddizione con l'attuale estensione (corpi glaciali più piccoli di quello che sono oggi). Nell'impossibilità di correggere questi errori si è preferito mantenere il dato storico, stimato dal nostro punto di vista in eccesso quanto in difetto e quindi auto compensativi.

Sono stati inoltre indagati i seguenti catasti già digitalizzati: il Catasto del Comitato Glaciologico Trentino della Società degli Alpinisti Tridentini (1987), il Catasto PAT del 2003 ed il Catasto PAT-Muse del 2013.

Tutti questi catasti, unitamente a quello redatto nel 1927 dal Generale Porro (Porro, 1925; Porro & Labus, 1927) sono stati di fondamentale importanza per ricostruire l'evoluzione dei ghiacciai in termini areali, di frammentazione attraverso la creazione di un diagramma ad albero e di posizione del fronte glaciale (quota minima della fronte).

La digitalizzazione di tutti questi catasti ha portato ad ottenere elaborati cartografici che riescono a descrivere l'evoluzione dei ghiacciai trentini nei diversi intervalli temporali: PEG – 1959 – 1987 – 2003 – 2013 (fig. 5.1).

La stessa digitalizzazione in ambiente GIS ha permesso l'esecuzione di calcoli statistici sugli areali dei ghiacciai. Oggi, in Trentino, l'estensione glaciale è di 32,2 km², il 28,5% di quella presente nel massimo del PEG, pari a 112,8 km². In questo computo è stata considerata solo la superficie del Ghiacciaio dell'Adamello – Mandrone che compete alla provincia di Trento, in quanto questo ghiacciaio, il più grande d'Italia (16 km²), si trova a cavallo tra le provincie di Trento e Brescia. Da una riduzione percentuale media annua di 0,48 nel periodo PEG-1958, si è passati a perdere l'1,79% annuo nel decennio 2003-2013, il massimo tasso di riduzione mai registrato dalla fine della Piccola Età Glaciale (fig. 5.2) e pari a quasi oltre 3 volte l'arretramento che si registrava nel periodo PEG – 1958. Questi dati risultano in accordo con le misure di variazione frontale raccolte annualmente dal Comitato

Glaciologico Italiano (Società Italiana per il progresso delle Scienze, 1914-1948; Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1950-1977; Comitato Glaciologico Italiano, 1978-2013).

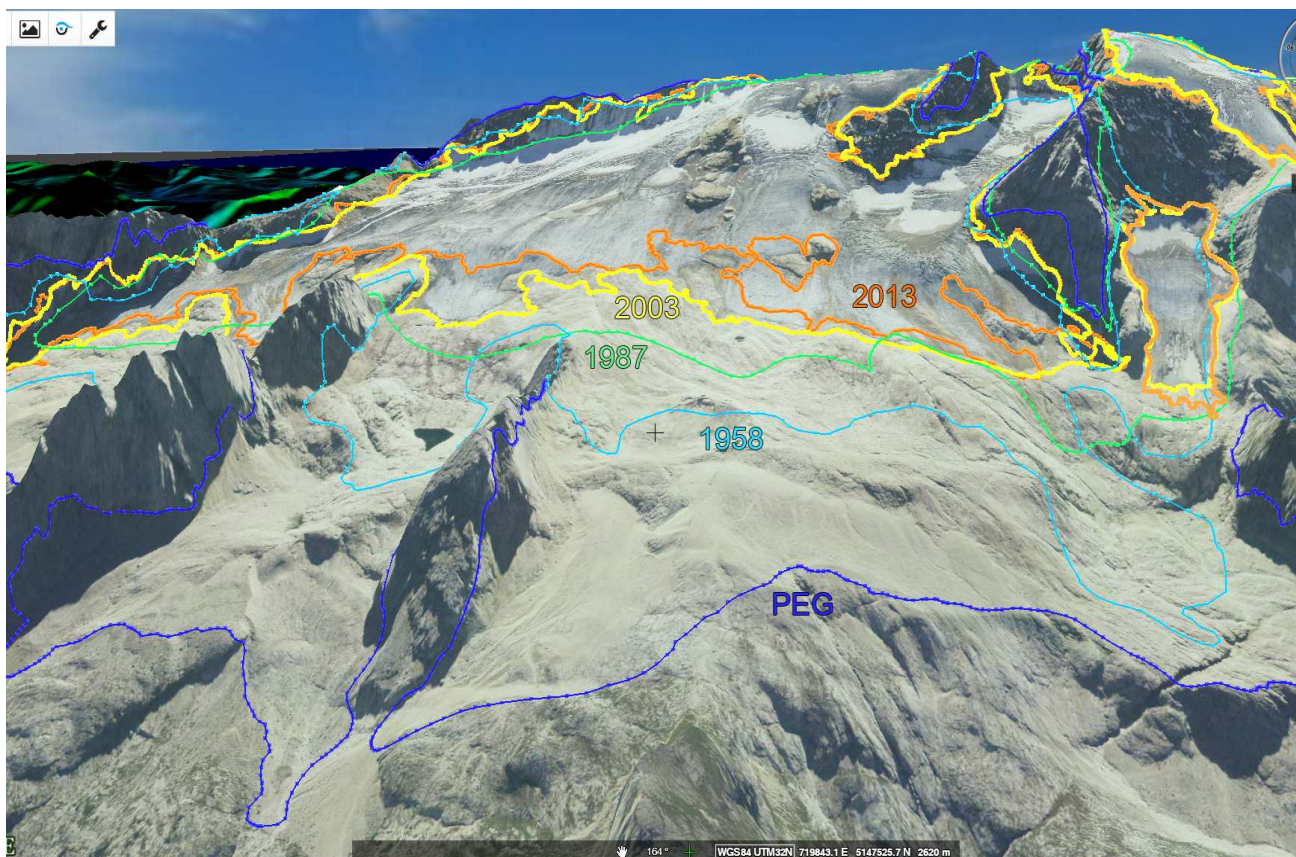


Fig. 5.1. I limiti del Ghiacciaio Principale della Marmolada nei periodi considerati.

	PEG	1958	1987	2003	2013
Superficie	112,8	54,2	50,9	39,3	32,2
ΔS medio annuo (%)		-0,48	-0,21	-1,43	-1,79

Fig. 5.2. Estensione dei ghiacciai e riduzione media annua della superficie nei diversi periodi.

Il gruppo montuoso che ha fatto registrare la maggiore contrazione areale, rispetto alla superficie presente nel massimo della PEG, è stato quello delle Dolomiti di Brenta (-86,5%), seguito dagli altri due gruppi montuosi dolomitici delle Pale di San Martino (-82,1%) e della Marmolada (-74,9%). Quello che invece ha visto i ghiacciai contrarsi di meno è il Gruppo dell'Adamello (-64,7%). I gruppi dolomitici sono quindi quelli che, considerando l'intero periodo dal massimo della PEG ad oggi, hanno maggiormente sofferto del riscaldamento climatico.

Nel Gruppo del Cevedale e nelle Pale di San Martino, la superficie presente nel 1987 era maggiore di quella del 1958, sottolineando come in questi gruppi montuosi l'avanzata dei ghiacciai degli anni '70-'80, verificatasi in tutti i gruppi, sia stata più importante.

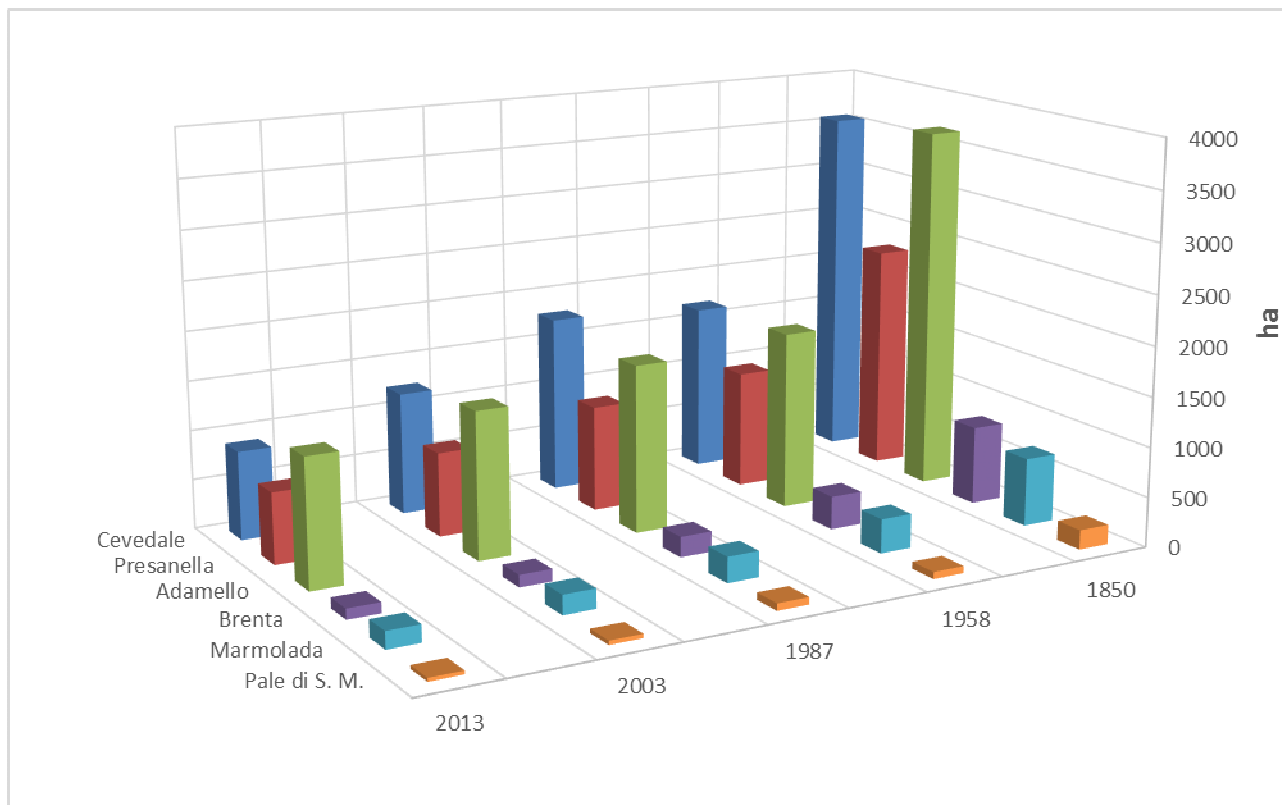


Fig. 5.3. Estensione areale in ettari presente nei diversi gruppi montuosi nei diversi momenti considerati. Le variazioni e le diverse situazioni sono state commentate nel testo nel §4.1

Nell'ultimo periodo 2003-2013 i ghiacciai dolomitici hanno fatto registrare una sommaria inversione di tendenza, con diminuzioni areali più contenute rispetto al precedente periodo 1987-2003 che invece ha fatto registrare per questi gruppi i maggiori arretramenti. Questa riduzione più contenuta del periodo 2003-2013 non è stata invece osservata per i gruppi del Cevedale, della Presanella e dell'Adamello, dove i ghiacciai nel 2003-2013 sono arretrati con tassi medi annui più elevati e senza precedenti. A registrare la contrazione areale media minima nel periodo 2003-2013 sono le Pale di San Martino con una riduzione di -0,6 ha/anno mentre è la Marmolada a registrare il tasso di riduzione percentuale minima nel periodo (-1,19 %/anno) (fig. 5.3).

La quota della fronte dei ghiacciai, mediamente localizzata nel massimo della PEG a 2.540 m di quota, si è spostata a 2.775 m. I ghiacciai più elevati sono localizzati nel Gruppo del Cevedale, mentre quelli più bassi nelle Pale di San Martino. È importante sottolineare come la posizione del fronte glaciale non risponda alle attuali condizioni climatiche (temperature estive e precipitazioni nevose invernali) ma a quelle presenti mediamente 3 anni prima.

La costruzione di un diagramma ad albero ha permesso di seguire l'evoluzione di ogni ghiacciaio, evidenziando quelle che sono state le estinzioni, frammentazioni e, in alcuni casi, anche l'aumento di masse glaciali. Dal diagramma emerge come, parallelamente ad una riduzione areale, a causa delle frammentazioni, il numero dei ghiacciai sia in aumento.

6. BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- Avanzini M., Salvador. I. (2014), "Antichi pastori. Sopravvivenze, tradizione orale, storia, tracce nel paesaggio e archeologia", Atti della Tavola Rotonda Bosco Chiesanuova (VR), 26-27 ottobre 2013, Muse - Museo delle Scienze di Trento
- Baroni C. & Carton A. (1990), "Variazioni oloceniche della Vedretta della Lobbia (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali)", *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria.*, 13, 105-119
- Baroni C. & Carton A. (1996), "Geomorfologia dell'Alta Val di Genova (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali)", *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria.*, 19, 3-17
Allegato: Carta geomorfologica dell'Alta Val di Genova (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali)
- Casarotto C. & Rizzi G. (2015), "Impact of climate variability on Trentino glaciers", 19th Alpine Glaciology Meeting, Milano
- Cerutti A.V. (a cura di), "Raccolta di scritti di U. Monterin", 6 voll., Aosta 1988-1990
- Comitato Glaciologico Italiano (1978-2013). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 1-36.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (1950-1977) - *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano. Seconda serie, 1-25 parte II*
- Consiglio Nazionale delle Ricerche & Comitato Glaciologico Italiano (1961), "Catasto dei ghiacciai italiani. Volume III – Ghiacciai della Lombardia e dell'Ortles-Cevedale", Comitato Glaciologico Italiano, XVII-389; 318 tavole; 269 illustrazioni
- Consiglio Nazionale delle Ricerche & Comitato Glaciologico Italiano (1962), "Catasto dei ghiacciai italiani. Volume IV – Ghiacciai delle Tre Venezie e dell'Appennino", Comitato Glaciologico Italiano, XXVII-309; 306 tavole; 207 illustrazioni
- Dansgaard W., Johnsen S. J., Møller J. & Langway Jr. C. C. (1969), "One Thousand Centuries of Climatic Record from Camp Century on the Greenland Ice Sheet Science", Vol. 166 no. 3903 pp. 377-380 DOI: 10.1126/science.166.3903.377
- Denton G.H. & Porter S.C. (1970), "Neoglaciation", *Scientific American* 22, 101-110
- Desio A. (1967), "I ghiacciai del Gruppo Ortles – Cevedale (Alpi centrali)", Tavole. Consiglio Nazionale delle Ricerche & Comitato Glaciologico Italiano
- Gruppo Nazionale Geografia Fisica e Geomorfologia CNR (1986), "Ricerche geomorfologiche nell'Alta Val di Peio (Gruppo del Cevedale)", *Geografia fisica e dinamica del Quaternario*, 9, 137-191
Allegato: Carta Geomorfologica dell'Alta Val di Peio (Gruppo del Cevedale)
- Holzhauser, H., Magny, M. & Zumbuhl, H. (2005), "Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years", *The Holocene* 15: 789-801
- Le Roy Ladurie E. (1974), "Histoire humaine et comparée du climat", Vol. 1: Canicules et glaciers (XIIIe - XVIIIe siècle)
- Le Roy Ladurie E. (1982), "Tempo di festa, tempo di carestia. Storia del clima dall'anno mille", Einaudi, Torino
- Le Roy Ladurie E., (2004), "Histoire humaine et comparée du climat" Paris: Fayard, I. Canicules et glaciers XIII-XVIII siècles
- Matthes F. (1939), "Report of Committee on Glaciers", *Trans. Am. Geophys. Union*, 20, 518-535

- Porro C. (1925), "Elenco dei Ghiacciai Italiani. Monografia statistica del Generale Carlo Porro", Ministero dei Lavori Pubblici, Servizio Idrografico, Ufficio Idrografico del Po, Parma
- Porro C. & Labus P. (1927), "Atlante dei ghiacciai italiani. Parte Prima", Carta corografica 1:500.000. Istituto Geografico Militare, Società Italiana per il progresso delle Scienze (1914-1948) - Bollettino del comitato glaciologico italiano. Prima serie, 1-25
- Porter S.C. & Denton G.H (1967), "Chronology of the neo-glaciation in the North American cordillera", American Journal of Science 265:177-210
- Progetto CARG, Foglio n°24 "Bormio", scala 1:50.000
- Progetto CARG, Foglio n°25 "Rabbi", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n°26 "Appiano", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n°28 "La Marmolada", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n°42 "Malè", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n°43 "Mezzolombardo", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n°58 "Adamello", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n° 59 "Tione di Trento", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n°60 "Trento", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n° 80 "Riva del Garda", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Foglio n° 82 "Asiago", scala 1:50.00
- Progetto CARG, Tavola 25 III "Rabbi", scala 1:25.000
- Progetto CARG, Tavola 26 III "Fondo", scala 1:25.000
- Progetto CARG, Tavola 42 III "Madonna di Campiglio", scala 1:25.000
- Progetto CARG, Tavola 42 IV "Peio", scala 1:25.000
- Progetto CARG, Tavola 45 III "S. Martino di Castrozza ", scala 1:25.000
- Progetto CARG, Tavola 80 IV "Roncone", scala 1:25.000
- Progetto CARG, Sezione n. 042130 "Laghi di Cornisello", scala 1:10.000
- Seppi R. (1999), "Geomorfologia dell'Alta Valle di Saent (Valle di Rabbi, Gruppo Ortles-Cevedale)", Studi Trentini di Scienze Naturali - Acta Geologica, v.76, 17-31
Allegato: Carta geomorfologica dell'Alta Valle di Saent (Valle di Rabbi, Gruppo Ortles-Cevedale)
- Tobaldo M. et al. (2002), "Carta geologica del settore nord occidentale del Monte Pasubio (Trentino, Italia) scala 1:10.000", Studi Trentini di Scienze Naturali – Acta Geologica, v. 79
- USGS (2000), "The Sun and Climate", Fact Sheet FS-095-00, August 2000

7. ALLEGATI

Elaborati cartografici:

- Estensione glaciale in Trentino nel massimo della Piccola Età Glaciale e nel 2013
- I ghiacciai nel Gruppo del Cevedale nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG
- I ghiacciai nel Gruppo della Presanella nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG
- I ghiacciai nel Gruppo dell'Adamello nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG
- I ghiacciai nel Gruppo delle Dolomiti di Brenta nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG
- I ghiacciai nei Gruppi della Marmolada e dei Monzoni nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG
- I ghiacciai nel Gruppo delle Pale di San Martino nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG
- I ghiacciai nei gruppi del Catinaccio, Cima d'Asta e Carega nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG

- Diagramma ad albero

Supporto informatico:

cartografia:

- Estensione glaciale in Trentino nel massimo della Piccola Età Glaciale e nel 2013.**pdf**
- I ghiacciai nel Gruppo del Cevedale nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG.**pdf**
- I ghiacciai nel Gruppo della Presanella nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG.**pdf**
- I ghiacciai nel Gruppo dell'Adamello nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG.**pdf**
- I ghiacciai nel Gruppo delle Dolomiti di Brenta nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG.**pdf**
- I ghiacciai nei Gruppi della Marmolada e dei Monzoni nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG.**pdf**
- I ghiacciai nel Gruppo delle Pale di San Martino nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG.**pdf**
- I ghiacciai nei gruppi del Catinaccio, Cima d'Asta e Carega nel massimo della Piccola Età Glaciale, 1958, 1987, 2003 e 2013 e limiti morfologici della PEG.**pdf**

- Diagramma ad albero.**pdf**

 GIS:

- progetto ArcGIS 10.1 Ghiacciai PEG-2013.mxd

 vector:

- geodatabase Ghiacciai PEG-2013.mdb
- confine provinciale confine-TN.shp e file ad esso collegati
- Legende shapefile
 - Ghiacciai estinti nel catasto 1958.lyr
 - Limiti dei ghiacciai minori nel 2003.lyr
 - Limiti dei ghiacciai nel 1958.lyr
 - Limiti dei ghiacciai nel 1987.lyr
 - Limiti dei ghiacciai nel 2003.lyr
 - Limiti dei ghiacciai nel 2013.lyr
 - Limiti dei ghiacciai nel massimo della Piccola Età Glaciale.lyr
 - Limiti morfologici della Piccola Età Glaciale.lyr

AUTORI



Muse – Museo delle Scienze
Corso del Lavoro e della Scienza, 3 – 38122 Trento
www.muse.it

Dott.ssa Elena Bertoni, collaboratrice Sezione di Geologia e Paleontologia del Muse
elena.bertoni@muse.it
0461 270429

Coordinamento scientifico:
Dott. Christian Casarotto, glaciologo e mediatore culturale del Muse
christian.casarotto@muse.it
0461 270345

Ringraziamenti

Si ringrazia il Servizio Sviluppo Sostenibile e Aree Protette per aver finanziato il presente progetto di ricerca, l'Osservatorio Trentino sul clima per il coordinamento tecnico-scientifico, il dott. Marco Avanzini, responsabile della Sezione di Geologia e Paleontologia del Muse per aver appoggiato questo lavoro e il revisore scientifico del progetto dott. Christian Casarotto, l'Ufficio Previsioni e Pianificazione della PAT che insieme al Muse ha permesso l'utilizzo dei dati dei ghiacciai del 2013, non ancora pubblicati, consentendo di allargare la panoramica su quella che è stata l'evoluzione dei ghiacciai dalla PEG fino ai nostri giorni. Si ringraziano inoltre Paolo Bonvecchio, Francesco Papi e Franco Modena per il supporto tipografico e Aron lemma per l'aiuto nell'elaborazione dei dati GIS.